

AALTO-YLIOPISTO  
INSINÖÖRITIEIDEIDEN KORKEAKOULU

Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos  
Liikenne- ja tietekniikka

Kyösti Kanerva

**RAKENNEMITOITUSMENETELMÄT RASKAILLE PYÖRÄKUORMILLE JA  
KONTTIKUORMILLE SEKÄ RAKENNETTUIJEN KENTTIEN KOKEELLINEN  
TUTKIMUS**

Tietekniikan syventymiskohteen diplomityö,  
joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 18.4.2011

Valvoja: professori Terhi Pellinen  
Ohjaajat: professori Terhi Pellinen  
ma professori Leena Korkiala-Tanttu

|                       |  |                   |                         |
|-----------------------|--|-------------------|-------------------------|
| <b>Tekijä:</b>        | Kyösti Kanerva   |                   |                         |
| <b>Diplomityö:</b>    | Rakennemitoitusmenetelmät raskaille pyöräkuormille ja konttikuormille sekä rakennettujen kenttien kokeellinen tutkimus |                   |                         |
| <b>Päivämäärä:</b>    | 18.4.2011  | <b>Sivumäärä:</b> | 132 s. + liitteet 75 s. |
| <b>Professuuri:</b>   | Tietekniikka   | <b>Koodi:</b>     | Yhd-10                  |
| <b>Työn valvoja:</b>  | Professori Terhi Pellinen  |                   |                         |
| <b>Työn ohjaajat:</b> | Professori Terhi Pellinen, ma professori Leena Korkiala-Tanttu   |                   |                         |
| <b>Avainsanat:</b>    | tierakennemitoitus, raskas pyöräkuorma, konttikuorma, redusoitu pyöräkuorma, Vuosaaren satama, HIPAVE, suoralaskenta,  |                   |                         |

Suomessa ei ole virallista ohjeistusta raskaasti kuormitetuille kentille tehtävää rakennemitoitusta varten. Kohteen vaativuudesta riippuen mitoitukset on tehty kokemusperäisesti soveltaen joko tierakenteiden suunnitteluohjeita ja mitoitusmenetelmiä tai ulkomaisia suunnitteluohjeita. Vuonna 2003 tehty Vuosaaren sataman vaativa rakennemitoitus on hyvä esimerkki kyseisestä käytännöstä. Tutkimuksen tavoitteina oli selvittää miten hyvin ulkomaiset rakennemitoitusmenetelmät soveltuvat Suomen oloihin. Toisena tavoitteena oli tutkia kokeellisesti pääkaupunkiseudulle rakennettujen raskaasti kuormitettujen kenttien rakennekerroksia ja rakenteiden kuormituskestävyyttä ja vaurioitumista käytön aikana.

Mitoitusmenetelmien tutkimuksessa kiinnitettiin erityisesti huomiota dynaamisiin ja staattisiin mitoituskuormiin, mitoituskriteereihin, rakennekerrosmateriaaleihin sekä pysyvien muodonmuutosten huomioon ottamiseen. Tutkimuksessa käsitellyt mitoitusmenetelmät olivat yhdysvaltalaisen Asphalt Institutin mitoitushje syväasfalttirakenteille sekä Englannin (Interpave) ja Ruotsin (CBI) betoniyhdistyksien mitoitushjeet betonikivipäällysteille. Tutkimuksessa käsiteltiin myös australialaista HIPAVE-ohjelmaa, joka on tie- ja lentokenttärakenteiden mitoituksessa käytettyjen CIRCLY- ja APSDS-ohjelmien jatkokehityksen tulos. Lisäksi tutkimuksessa analysoitiin Vuosaaren sataman rakennekerroksien mitoitusprosessia ja tehtiin Vuosaaren sataman rakennekerroksien vaihtoehtoinen mitoitus tutkituilla mitoitusmenetelmillä.

Kokeellisen tutkimuksen pääkohteet olivat Jätkäsaaren ja Sompasaaren vanhat satamakentät sekä Tikkurilan linja-autoterminaali. Kokeellinen tutkimus koostui kokekohteissa tehdyistä pudotuspainomittauksista ja maatumittauksista sekä laboratoriossa tehdyistä jäykkyysmoduulikokeista, jaksollisista virumiskokeista ja sideainekokeista. Rakennekerrosten jäykkyysmoduulit määritettiin suoralaskentamenetelmällä mitattujen taipumasuppiloiden ja maatumittauksen rakennekerrostulkinnan perusteella.

Kokeellisen tutkimuksen perusteella Jätkäsaaren sataman rakennekerrokset olivat täyttömaata ja päällysteen paksuus oli 50 - 350 mm. Sompasaaren kokekohde oli perustettu kalliopohjalle ja kokonaisrakennepaksuus oli 400 - 550 mm ja päällysteen paksuus 60 - 150 mm. Tikkurilan linja-autoterminaalissa perusparannuksen yhteydessä rakennetun uuden kantavaan kerrokseen alle jätetty vettä läpäisemätön vanha asfalttikerros aiheutti rakenteen deformatumista keväisin roudan sulaessa ja kantavan kerroksen vesipitoisuuden kasvaessa

CBI:n mitoituskriteeri ja materiaaliparametrit staattisille kuormille sekä Interpaven käyttämät konttikuormat soveltuvat käytettäväksi Suomessa tavanomaisille pohjamaille. Käytetyt mitoitusmenetelmät eivät kuitenkaan soveltuneet kalliopohjalle tai louhetäyttöille rakennettavien kerroksien mitoitukseen, koska laskentatavat olivat soveltumattomia ja/tai mitoitusdiagrammeja ei ollut tehty kantaville pohjamaille. HIPAVE:ssa monimutkaiset kuormituskokonaisuudet pystytään ottamaan huomioon muita mitoitusmenetelmiä paremmin, mutta menetelmän soveltuvuuden syvällisempi tarkastelu vaatii kuitenkin HIPAVE-ohjelman täysversion käyttöä.

|                     |   |               |                     |
|---------------------|---|---------------|---------------------|
| <b>Author:</b>      | Kyösti Kanerva  |               |                     |
| <b>Thesis:</b>      | Assessment of structural design methods for heavy wheel loads and container loads with the experimental study of existing heavy duty industrial pavements |               |                     |
| <b>Date:</b>        | 18.4.2011   | <b>Pages:</b> | 132 p. + app. 75 p. |
| <b>Chair:</b>       | Highway Engineering   | <b>Code:</b>  | Yhd-10              |
| <b>Supervisor:</b>  | Professor Terhi Pellinen  |               |                     |
| <b>Instructors:</b> | Professor Terhi Pellinen, Professor Leena Korkiala-Tanttu   |               |                     |
| <b>Key words:</b>   | pavement design, heavy wheel load, container load, equivalent single-wheel load, Vuosaari harbor, HIPAVE, forwardcalculation                              |               |                     |

In Finland, there are no official guidelines for the thickness design of heavy duty structures loaded with heavy wheel loads and containers loads. Structural designs have been made either empirically applying national guidelines and design methods developed for the road pavements or using international design methods developed for the heavy wheel loads. The thickness design of the Port of Helsinki, Vuosaari Harbor is a good example of this type of practice. Objectives of the thesis were to assess four international structural design methods for the Finnish subgrade conditions and to investigate existing heavy duty industrial structures in the Helsinki metropolitan area.

In the evaluation of design methods, a special attention was paid to the dynamic and static loads, failure criteria, layer materials, and a consideration of a permanent deformation. Assessed design methods were the Asphalt Institute full-depth thickness design method (USA), Interpave's (United Kingdom) and CBI's (Sweden) methods for concrete block paving, and the Australian advanced heavy duty industrial pavement design procedure and software called HIPAVE. In addition, the original thickness designs of Vuosaari Harbor, developed in 2003, were examined. The HIPAVE is a result of a further development of the CIRCLY- and APSDS-design programs for the road and airport pavements. The Asphalt Institute, Interpave and CBI design methods were also employed to develop an alternative thickness design for the Vuosaari Harbor area.

The existing structures investigated were old port areas of Jätkäsaari and Sompasaari in Helsinki and the Tikkurila bus terminal in Vantaa. Structural field tests were conducted using the Falling Weight Deflectometer (FWD) and the Ground Penetrating Radar (GPR). Laboratory tests for asphalt mixtures included indirect tensile stiffness modulus, cyclic creep test for the permanent deformation and penetration and softening point tests for bitumen. A forwardcalculation method was used to determine layer stiffness moduli from the FWD deflection bowls utilizing GRP data for the layer thickness interpretation.

Based on the experimental study, the Jätkäsaari Harbor was built on land fill and thickness of the structural layers varied between 50 - 350 mm. The test site of Sompasaari port was built on rock foundation, the total layer thickness was 400 - 550 mm and the asphalt pavement thickness was 60 - 150 mm. In the Tikkurila bus terminal, during rehabilitation an impermeable old asphalt pavement layer was left underneath an unbound base layer, which caused structural damages in the spring time when frost was melting.

The CBI failure criteria, the static stiffness moduli values, and the Interpave's container loads seem to be applicable to be used in Finland. However, none of the studied design methods were applicable for the thickness design when subgrade was rock foundation or rock-fill embankment because of theoretical deficiencies or lack of design charts. The HIPAVE was the most convenient design method for managing complicated combinations of container loads. However, more research is needed and the full version of the HIPAVE-program should be used instead of demo version used.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Pöyry Finland Oy:n rahoituksella ja yhtiön toimitiloissa Vantaalla. Työn rahoitukseen osallistui myös Vantaan kaupunki, jolle tehtiin erillinen Pöyryn projekti tämän työn kokeellisen osuuden perusteella.

Kokeellisesta tutkimuksesta tahtoisin kiittää Espoon, Helsingin ja Vantaan kaupunkia mittaus- ja porauskalustojen maksuttomasta käytöstä kokeellisen tutkimuksen aikana. Pudotuspainomittauksista tahtoisin kiittää Road Consulting Oy:n toimistopäällikköä Juha-Matti Vainiota ja maatutkamittauksista sekä neuvoista niiden tulkinnassa Roadscanners Oy:n FM Mika Silvastia, DI Petri Varinia ja FT Timo Saarenketoa. Lisäksi tahtoisin kiittää koko Roadscannersin Tampereen toimiston väkeä, kun pääsin toimistollenne tekemään tulkintoja työtäni varten. Koekohteista tahtoisin kiittää Helsingin kaupungin rakennusvirastoa, Vantaan kaupunkia, Finnsteveä, DB Schenkeriä, Nobinaa, Veoliaa ja Åbergin linjaa. Erityisesti tahtoisin kiittää Vuosaaren sataman käyttöpäällikkö Timo Karttusta ja kenttäpäällikkö Harri Nordströmiä Vuosaaren sataman koekohteista ja kiinnostuksesta tätä tutkimusta kohtaan. Laboratoriomittauksia helpottivat koko liikenne- ja tietekniikan tutkimusryhmältä saamani tuki ja kannustus. Laboratoriomittauksista erityiset kiitokset ansaitsevat DI Pablo Olmos, DI Markus Simonen, laboratoriomestari Petri Peltonen sekä harjoitusmestari Jorma Salonen. Jätkäsaaren koekohteeseen liittyvistä tiedoista sekä Vuosaaren sataman rakennemitoitusraporteista tahtoisin kiittää Ramboll Finland Oy:n DI Tommy Nymania sekä DI Janne Sikiötä.

Tätä tutkimusta ei olisi kuitenkaan tehty ilman ma professori Leena Korkiala-Tanttua, jota tahtoisin kiittää mielenkiintoisen ja haastavan aiheen lisäksi myös työn ohjauksesta ensin Pöyryllä ja myöhemmin Aalto-yliopistolla. Tahtoisin kiittää myös professori Terhi Pellistä tinkimättömästä ohjauksesta ja suunnan näyttämisestä tämän työn aikana sekä TkT Jarkko Valtosta kannustuksesta ja neuvoista tämän työn ja koko kuuden vuoden korkeakouluopiskelujeni aikana. Lisäksi tahtoisin kiittää TkT Heikki Jämsää kannustuksesta, kommentaista ja tuesta sekä tämän työn aikana että muutenkin elämässä.

Lopuksi tahtoisin kiittää perhettäni, sukulaisiani ja kavereitani tuesta ja kannustuksesta sekä työkavereitani Pöyryllä kärsivällisyydestä tätä työtä kohtaan.

Vantaalla huhtikuussa 2011

---

Kyösti Kanerva



# SISÄLLYSLUETTELO

|   |    |
|---|----|
| KÄSITTEET JA LYHENTEET .....  | 7  |
| MERKINNÄT .....   | 9  |
| MITTAYKSIKÖIDEN MUUNNOKSET .....  | 11 |
| 1. JOHDANTO .....   | 12 |
| 1.1. Taustaa .....  | 12 |
| 1.2. Ongelmanasettelu .....   | 14 |
| 1.3. Tavoite ja tutkimusmenetelmät .....                                | 16 |
| 1.4. Tutkimuksen rajaukset .....  | 16 |
| 2. TIERAKENTEEN MITOITUSPERUSTEET .....                                 | 17 |
| 2.1. Jännitykset ja kriittiset muodonmuutokset .....                    | 17 |
| 2.2. Rakennekerrosmateriaalit ja materiaaliparametrit .....             | 19 |
| 2.2.1. Sitomattomat kerrokset ja pohjamaa .....                         | 19 |
| 2.2.2. Asfalttibetoni .....   | 22 |
| 2.2.3. Erikoispäällysteet .....   | 24 |
| 2.3. Kantavuus .....  | 24 |
| 2.3.1. Pohjamaan kantavuus - CBR-koe .....                              | 24 |
| 2.3.2. Tierakenteen kokonaiskantavuus .....                             | 26 |
| 2.4. Mitoituskuormat .....  | 27 |
| 2.4.1. Ekvivalenttiakselikuormitus .....                                | 27 |
| 2.4.2. Ekvivalenttipyöräkuormitus .....                                 | 27 |
| 2.5. Kuormituskestävyyshitoitus .....                                   | 28 |
| 2.6. Suomessa käytetyt hitoitushenetelmät .....                         | 30 |
| 2.6.1. Odemarkin menetelmä .....  | 30 |
| 2.6.2. APAS-monikerroslaskenta .....                                    | 32 |
| 3. RAKENNEMITOITUKSEN KEHITYS RASKAILLE PYÖRÄKUORMILLE .....            | 34 |
| 3.1. Ensimmäiset hitoitushenetelmät lentokentille .....                 | 35 |
| 3.1.1. CBR-menetelmä - U.S. Army Corps of Engineers .....               | 35 |
| 3.1.2. Asphalt Institutun menetelmä .....                               | 38 |
| 3.2. Redusoitu pyöräkuorma ja sen laskentaperiaatteet .....             | 39 |
| 3.2.1. Boussinesqin yksikerrosteoria .....                              | 40 |
| 3.2.2. Burmisterin kaksikerrosteoria .....                              | 43 |
| 4. MITOITUSHENETELMÄT RASKAILLE PYÖRÄKUORMILLE JA KONTTIKUORMILLE ..... | 45 |
| 4.1. Asphalt Institute - Yhdysvallat .....                              | 45 |
| 4.1.1. Mitoituskuormat .....  | 45 |
| 4.1.2. Mitoitus yksikköpyörälle .....                                   | 46 |
| 4.1.3. Mitoitus paripyörälle .....                                      | 47 |
| 4.1.4. Mitoitus monipyörälle .....                                      | 49 |
| 4.2. Interpave - Englanti .....   | 53 |
| 4.2.1. Laskentaperiaate ja rakennekerrosmateriaalit .....               | 53 |
| 4.2.2. Mitoituskuormat pyöräkuormille .....                             | 55 |
| 4.2.3. Mitoituskuormat konttikuormille .....                            | 58 |
| 4.2.4. Rakennekerrosten hitoitushenet .....                             | 59 |
| 4.3. Betonginstitutet, CBI - Ruotsi .....                               | 61 |
| 4.3.1. Mitoituskuormat .....  | 61 |
| 4.3.2. Rakennekerrosvaihtoehdot ja materiaaliparametrit .....           | 62 |
| 4.3.3. Mitoitus pyöräkuormille .....                                    | 65 |
| 4.3.4. Mitoitus konttikuormille .....                                   | 67 |
| 4.4. HIPAVE - Australia .....   | 69 |
| 4.4.1. Mitoituskuormat .....  | 69 |
| 4.4.2. Mitoitushetrit .....   | 69 |
| 4.5. Vuosaaren sataman hitoitushenet .....                              | 71 |
| 4.5.1. Mitoituskuormat .....  | 71 |

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 4.5.2. | Rakennekerrosratkaisut ja rakennekerrosmateriaalit .....                            | 73  |
| 4.5.3. | Mitoituslaskennat ja lopulliset rakenteet .....                                     | 73  |
| 4.6.   | Yhteenveto mitoitusmenetelmistä .....   | 75  |
| 5.     | RAKENNETTUIJEN KENTTIEN KOKEELLINEN TUTKIMUS – AINEISTO JA MENETELMÄT .....         | 76  |
| 5.1.   | Tutkimusmenetelmät .....  | 76  |
| 5.2.   | Laboratoriokokeet; koemenettelyt .....  | 76  |
| 5.2.1. | Koekappaleiden mitat, massat ja tiheydet sekä päällystekiviaineksen rakeisuus ..... | 76  |
| 5.2.2. | Tunkeumakoe ja pehmenemispisteen määrittäminen .....                                | 77  |
| 5.2.3. | Epäsuora vetokoe .....  | 78  |
| 5.2.4. | Jaksollinen virumiskoe .....  | 79  |
| 5.3.   | Kenttäkokeet; koemenettelyt .....   | 80  |
| 5.3.1. | Pudotuspainomittaus .....   | 80  |
| 5.3.2. | Maatutkamittaus .....   | 82  |
| 5.4.   | Jäykkyysmoduulien suoralaskenta .....   | 83  |
| 5.4.1. | Takaisinlaskennan ja suoralaskennan erot .....                                      | 83  |
| 5.4.2. | Suoralaskenta Road Doctor Pro:lla .....   | 84  |
| 5.5.   | Kokeellisten menetelmien yhteenveto ja koekohteet .....                             | 85  |
| 5.5.1. | Jätkäsaaren Saukonlaituri .....   | 86  |
| 5.5.2. | Sompasaaren satamakenttä .....  | 88  |
| 5.5.3. | Tikkurilan linja-autoterminaali .....   | 89  |
| 5.5.4. | Muut koekohteet .....   | 90  |
| 6.     | TULOKSET .....  | 93  |
| 6.1.   | Laboratoriokokeet .....   | 93  |
| 6.1.1. | Päällystekiviaineksen rakeisuus ja koekappaleiden tyhjätilat .....                  | 93  |
| 6.1.2. | Sideainepitoisuudet, tunkeumakoe ja pehmenemispisteen määrittäminen .....           | 94  |
| 6.1.3. | Epäsuora vetokoe .....  | 94  |
| 6.1.4. | Jaksollinen virumiskoe .....  | 96  |
| 6.2.   | Kenttäkokeet ja suoralaskenta .....   | 98  |
| 6.2.1. | Sitomattomien rakennekerrosten tutkimus .....                                       | 98  |
| 6.2.2. | Pudotuspainomittaukset .....  | 99  |
| 6.2.3. | Maatutkamittaus ja suoralaskenta .....  | 102 |
| 7.     | VUOSAAREN SATAMAN RAKENNEKERROKSIEN VAIHTOEHTOINEN MITOITUS .....                   | 107 |
| 7.1.   | Mitoitusmenetelmät .....  | 107 |
| 7.2.   | Mitoituskuormat .....   | 108 |
| 7.3.   | Mitoitustulokset .....  | 109 |
| 7.3.1. | Raskas pyöräkuorma .....  | 109 |
| 7.3.2. | Konttikuormat .....   | 111 |
| 8.     | POHDINTAA .....   | 112 |
| 9.     | YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....  | 122 |
|        | LÄHTEET .....   | 126 |
|        | LIITTEET .....  | 131 |

## KÄSITTEET JA LYHENTEET

|                           |  |
|---------------------------|--|
| <b>AASHO</b>              | American Association of State Highway Officials. Vuodesta 1973 lähtien AASHTO.   |
| <b>AASHTO</b>             | American Association of State Highway and Transportation Officials.  |
| <b>APAS</b>               | Analyyttinen päällysrakenteen suunnittelujärjestelmä. Suomalainen monikerroslaskentaohjelma tierakennekerrosten mitoitukseen.  |
| <b>APSDS</b>              | Airport Pavement Structural Design System. Australialainen tietokoneohjelma lentokenttien rakennekerrosten mitoitukseen.   |
| <b>BCI</b>                | Base curvature index. Pohjamaan kuntoa kuvaava indeksi, joka lasketaan pudotuspainolaitteella mitattujen taipumien perusteella.  |
| <b>BPA</b>                | British Ports Association. Englannin satamajärjestö.   |
| <b>CBI</b>                | Betonginstitutet. Ruotsin betoniyhdistys. Aiemmin Cement och Betong Institutet.  |
| <b>CBR</b>                | California Bearing Ratio. Rakennekerrosmateriaalin suhteellinen kantavuus, joka mitataan CBR-kokeella.   |
| <b>E2</b>                 | Pudotuspainolaitteen toisella pudotuskerralla mitattu kantavuusarvo, jota käytetään tierakenteiden mitoituskantavuutena.   |
| <b>FHWA</b>               | Federal Highway Administration. Yhdysvaltojen tiehallinto.   |
| <b>FWD</b>                | Falling weight deflectometer. Pudotuspainolaite.   |
| <b>HIPAVE</b>             | Heavy Duty Industrial Pavement Design. Australialainen tietokoneohjelma rakennekerroksien mitoitukseen raskaille pyöräkuormille.   |
| <b>INTERPAVE</b>          | Englantilainen betonikivipäällysteisiin ja reunakiviin liittyvä etujärjestö.   |
| <b>Kantavuus</b>          | Tierakennemitoituksen kantavuusarvo tarkoittaa pohjamaan ja rakennekerrosten yhteistä kykyä vastustaa muodonmuutosta kuormitustilanteessa. Pohjamaan kantavuusarvona käytetään pohjamaan materiaalin jäykkyysmoduulia. |
| <b>Levykuormituslaite</b> | Kantavuuden mittauslaite. Perustuu staattiseen kuormitukseen.  |
| <b>LTPP</b>               | Long-Term Pavement Performance. Yhdysvaltojen tiehallinnon tutkimusohjelma.  |

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| <b>Minerin laki</b>           | Tierakenteiden kestoiän laskennassa käytetty kaava, jossa vuodenajan kuormituskertojen määrä jaetaan samalle vuodenajalle sallitulla kuormituskertojen määrällä. Osamäärien summan käänteisluku vastaa tierakenteen kestoikää vuosissa. |
| <b>4. potenssin sääntö</b>    | Laskentatapa, jolla määritetään akselin vastaavuuskerroin käsiteltävän akselin ja standardiakselin osamäärän neljäntenä potenssina.   |
| <b>Pudotuspainolaite, PPL</b> | Kantavuuden mittauslaite. Perustuu dynaamiseen kuormitukseen.   |
| <b>Redusoitu pyöräkuorma</b>  | Yksikköpyöräksi yhdistetty pari- tai monipyörä mitoitusta varten.   |
| <b>SCI</b>                    | Surface curvature index. Päällysteen kuntoa kuvaava indeksi, joka lasketaan pudotuspainolaitteella mitattujen taipumien perusteella.  |
| <b>Standardiakseli</b>        | Analyttisen tierakennemitoituksen mitoituskuorma. Suomessa standardiakselipaino on 100 kN.  |
| <b>Suoralaskenta</b>          | Laskentatapa, jolla rakennekerrosten jäykkyysmoduulit voidaan laskea pudotuspainolaitteella mitatuista taipumista ilman iteraatiota.  |
| <b>Taipumasuppilo</b>         | Pudotuspainolaitteella mitattujen tien pinnan taipumien kuvaaja, jossa esitetään mitatut taipumat eri etäisyyksillä kuormituslevystä.   |
| <b>Takaisinlaskenta</b>       | Iteratiivinen laskentatapa, jolla määritetään rakennekerrosten jäykkyysmoduulit mitatun taipumasuppilon perusteella.  |
| <b>TEU</b>                    | Twenty foot equivalent unit. Konttiliikenteen perusmitta, joka vastaa 20 jalan (noin 6 metriä) pituista konttia. 40 jalan kontti vastaa 2 TEU:ta.   |
| <b>TPPT</b>                   | Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimusohjelma. Tiehallinnon ohjaama tutkimusohjelma vuosina 1994 - 2001, jonka päätoteuttaja oli VTT.  |
| <b>UTM -25</b>                | Universal testing machine. Aalto-yliopiston liikenne- ja tietekniikan tutkimusryhmän päällystekokeissa käytettävä testilaite, jonka kuormituskapasiteetti on 25 kN.   |
| <b>VTI</b>                    | Statens väg- och transportforskningsinstitut. Ruotsin kansallinen tie- ja liikennealan tutkimusinstituutti.   |
| <b>VTT</b>                    | Teknologian tutkimuskeskus. Ennen vuotta 2010 nimellä Valtion teknillinen tutkimuskeskus.   |
| <b>Vägverket</b>              | Ruotsin tielaitos.  |
| <b>WASHO</b>                  | Western Association of State Highway Officials.   |

## MERKINNÄT

(Ei sisällä liitteiden merkintöjä)

|            |  |
|------------|--|
| A          | Kuormituspinnan pinta-ala, leikkauspiste bitumin lämpötila-viskositeetti -kuvaajassa |
| CBR        | California Bearing Ratio   |
| CDF        | Kumulatiivinen vauriokerroin HIPAVE-ohjelmassa                                       |
| D          | Vauriokerroin Interpaven menetelmässä  |
| E          | Materiaalin jäykkyysmoduuli, materiaalin vetolujuus, kantavuus                       |
| $E_0$      | Jäykkyysmoduuli, kun pääjännitysten summa on 0                                       |
| $E_1$      | Alkuperäisen materiaalin jäykkyysmoduuli Odemarkin vastinkaavassa                    |
| $E_2$      | Korvaavan materiaalin jäykkyysmoduuli Odemarkin vastinkaavassa                       |
| $E_A$      | Kantavuus kerroksen alta Odemarkin kantavuuskaavassa                                 |
| $E_Y$      | Kantavuus kerroksen päältä Odemarkin kantavuuskaavassa                               |
| $E_{uusi}$ | Interpaven korvaavan materiaalin vetolujuus tai jäykkyysmoduuli                      |
| $ E^* $    | Asfalttibetonin dynaaminen moduuli   |
| $E^*$      | Asfalttibetonin kompleksinen moduuli   |
| EALF       | Akselin vastaavuuskerroin  |
| ESWL       | Redusoitu pyöräkuorma  |
| F          | Taipumakerroin   |
| $F_s$      | Taipumakerroin yksikköpyörälle   |
| $F_d$      | Taipumakerroin monipyörälle  |
| $K_0$      | Lepopainekerroin   |
| $K_1$      | Moduuliluku  |
| $K_2$      | ModuuliekspONENTTI   |
| L          | Kuormituskerroin, akselikuorma   |
| $L_1, L_2$ | Kuormituskertoimet 6 ja 16 tuuman kuormitussäteille Huangin kuvaajissa               |
| $L_0$      | Standardiakselikuorma  |
| $M_r$      | Jäykkyysmoduuli (resilient modulus)  |
| MEF        | Vastaavuuskerroin Interpaven menetelmässä  |
| $N_i$      | Kuormitustyyppille tai vuodenajalle sallittu kuormituskertojen määrä                 |
| N          | Sallittu kuormituskertojen kokonaismäärä   |
| $N_C$      | Kontin massajakauma Interpaven menetelmässä  |
| P          | Pyöräkuorma  |
| $P_e$      | Redusoitu pyöräkuorma (kuormituspaine) Asphalt Instituten ohjeessa                   |
| $P_d$      | Monipyörän yhden renkaan pyöräkuorma   |
| $P_s$      | Monipyörää vastaava yksikköpyöräkuorma (redusoitu pyöräkuorma)                       |
| $P_{tot}$  | Monipyörän kokonaiskuorma  |
| $S_d$      | Renkaiden keskeltä-keskelle -väli  |
| $S_m$      | Asfalttibetonin jäykkyysmoduuli  |
| $T_A$      | Päällystepaksuus Asphalt Instituten mitoitusohjeessa                                 |
| $T_{A/a}$  | Kerroin Asphalt Instituten mitoitusohjeessa  |
| VTS        | Bitumin lämpötila-viskositeetti -kuvaajan kulmakerroin                               |
| WPF        | Redusoidun pyöräkuorman laskentakeroin Interpaven menetelmässä                       |

|                  |  |
|------------------|--|
| a                | Kuormituspinnan säde   |
| a'               | Muutettu kuormitussäde Huangin redusoidun pyöräkuorman kuvaajissa      |
| b                | Kuormituskestävyysmitoituksessa käytettävä kerroin                     |
| d                | Monipyörän renkaiden lyhyin etäisyys toisistaan                        |
| f <sub>d</sub>   | Dynaaminen kuormituslisä   |
| h                | Kerrospaksuus, päällystepaksuus  |
| h'               | Muutettu päällystepaksuus Huangin redusoidun pyöräkuorman kuvaajissa   |
| h <sub>1</sub>   | Alkuperäinen kerrospaksuus Odemarkin vastinkaavassa                    |
| h <sub>2</sub>   | Korvaavan materiaalin kerrospaksuus Odemarkin vastinkaavassa           |
| h <sub>eff</sub> | Tehollinen syvyys Interpaven menetelmässä                              |
| k                | Kuormituskestävyysmitoituksessa käytettävä kerroin                     |
| n                | Korjauskerroin Odemarkin muuntokaavassa                                |
| n <sub>i</sub>   | Kuormitustyyppin tai vuodenajan kuormituskertojen määrä                |
| p                | Rengaspaine  |
| q                | Pinnan kuormitusjännitys, kosketuspaine                                |
| q <sub>s</sub>   | Yksikköpyörän kuormitusjännitys  |
| q <sub>d</sub>   | Monipyörän kuormitusjännitys   |
| r                | Pudotuspainolaitteen taipuma-anturin etäisyys kuormituslevystä         |
| s                | Pudotuspainolaitteella mitattu taipuma                                 |
| t                | Päällysteen lämpötila  |
| v                | Rakenteen kestoikä vuosissa  |
| w                | Kokoonpuristuma  |
| w <sub>s</sub>   | Kokoonpuristuma yksikköpyörälle  |
| w <sub>d</sub>   | Kokoonpuristuma monipyörälle   |
| z                | Laskentasyvyys   |
| α                | $S_d^2 + z^2$ Interpaven menetelmässä                                  |
| β                | Materiaalin jännitystilariippuvuuden kerroin                           |
| γ                | Materiaalin tilavuuspaino  |
| ε                | Suhteellinen muodonmuutos  |
| θ                | Pääjännitysten summa, jännitysinvariantti                              |
| θ <sub>0</sub>   | Pääjännitysten summan vertailujännitys                                 |
| σ <sub>z</sub>   | Pystysuuntainen normaalijännitys                                       |
| σ <sub>r</sub>   | Säteittäinen vaakasuuntainen normaalijännitys                          |
| σ <sub>t</sub>   | Tangentialinen vaakasuuntainen normaalijännitys                        |
| σ <sub>R</sub>   | Säteittäinen vetojännitys Interpaven ensisijaisesta mitoituspyörästä   |
| σ <sub>T</sub>   | Tangentialinen vetojännitys Interpaven toissijaisesta mitoituspyörästä |
| σ <sub>d</sub>   | Deviatorinen jännitys  |
| σ <sub>d0</sub>  | Deviatorisen jännityksen vertailujännitys                              |
| ν                | Poisson-luku   |

## MITTAYKSIKÖIDEN MUUNNOKSET

### SI-järjestelmä:

### Yhdysvaltojen mittajärjestelmä:

#### PITUUS

|                       |   |                      |
|-----------------------|---|----------------------|
| 1 millimetri (mm)     | → | 0,039 tuumaa (in)    |
| 25,4 millimetriä (mm) | ← | 1 tuuma (in)         |
| 1 metri (m)           | → | 3,281 jalkaa (ft)    |
| 0,305 metriä (m)      | ← | 1 jalka (ft)         |
|                       |   | 1 jalka on 12 tuumaa |

#### MASSA

|                        |   |                   |
|------------------------|---|-------------------|
| 1 kilogramma (kg)      | → | 2,205 paunaa (lb) |
| 0,454 kilogrammaa (kg) | ← | 1 pauna (lb)      |

#### JÄNNITYS, PAINE

|                      |   |                                      |
|----------------------|---|--------------------------------------|
| 1 pascal (Pa)        | → | 0,000145 paunaa per neliötuuma (psi) |
| 6894,8 pascalia (Pa) | ← | 1 pauna per neliötuuma (psi)         |

#### DYNAAMINEN VISKOSITEETTI, 60 °C

|                          |   |               |
|--------------------------|---|---------------|
| 1 pascalsekunti (Pas)    | → | 10 poisea (P) |
| 0,1 pascalsekuntia (Pas) | ← | 1 poise (P)   |

# 1. JOHDANTO

## 1.1. Taustaa

Asfalttipäällysteiset tierakenteet rakennettiin 1920-luvulle asti kokemuksen perusteella vakiopaksuudella pohjamaaolosuhteista riippumatta. Ensimmäiset varsinaiset tierakenteiden mitoitusmenetelmät kehitettiin Yhdysvalloissa, ja ne perustuivat vuonna 1929 julkaistuun pohjamaan maajiluokitukseen (Public Roads Soil Classification system). Mitoitusta varten oli kuitenkin tarpeen kehittää pohjamaaolosuhteita yksinkertaisemmin kuvaava mitoitusarvo. 1920-luvun lopulla kehitettiin CBR-koe (California Bearing Ratio) pohjamaan materiaalin suhteellisen kantavuuden eli CBR-arvon mittaamista varten. Vuonna 1942 julkaistiin ensimmäiset tierakenteiden mitoituskuvaajat kahdelle eri mitoituskuormalle pohjamaan eri CBR-arvoilla. (Huang, 2004. Yoder & Witczak, 1975)

Pelkästään pohjamaan kantavuuteen perustuvasta mitoituksesta siirryttiin 1950-luvulla rakenteen kuormituskertojen määrään perustuvaan mitoitukseen. Mitoitus perustui jännityksiin ja niiden aiheuttamiin kriittisiin muodonmuutoksiin. Nämä klassiset tierakennemitoituksessa käytetyt kriittiset muodonmuutokset ovat vetomuodonmuutos taipuvan sidotun kerroksen alapinnassa ja puristusmuodonmuutos pohjamaan yläpinnassa. Kriittiset muodonmuutokset voidaan määrittää joko analyttisesti laskemalla tai kokeellisesti mittaamalla, jolloin mitoitusmenetelmät voidaan jakaa lähtökohtansa perusteella analyttisiin (mekanistinen) ja kokeellisiin (empiirinen) menetelmiin. Molemmissa menetelmissä sallittu kuormituskertojen määrä selvitetään kuitenkin laboratoriokokeilla määritetyistä väsymissuorista. Tämän takia useimmat lähtökohtaisesti analyttiset menetelmät ovat puolianalyttisiä mitoitusmenetelmiä. Lisäksi useimpia lähtökohtaisesti kokeellisia mitoitusmenetelmiä on täydennetty laskennallisesti, joten voidaan puhua myös puolikokeellisista mitoitusmenetelmistä. (Ehrola, 1996. Huang, 2004)

Kokeelliset menetelmät perustuvat yleensä täysmittakaavaisiin tiekokeisiin, joissa mitataan kriittisiä muodonmuutoksia erilaisilla kuormilla ja kuormituskertojen määrillä. Analyttiset menetelmät perustuvat elastisuusteoriaan ja muodonmuutosten laskennalliseen määrittämiseen. Aluksi muodonmuutokset laskettiin Boussinesqin laskentateorian mukaiselle yksikerrosrakenteelle ja myöhemmin Burmisterin laskentateorian mukaisille kaksi- ja kolmikerrosrakenteille. Ruotsalainen Odemark julkaisi vuonna 1949 monikerrosrakentamismenetelmän, jossa monikerrosrakenteen muutettiin Burmisterin teorian mukaiseksi kaksikerrosrakenteeksi. Mitoituskriteereinä käytettiin puristusjännitystä pohjamaan pinnalla ja tien pinnan taipumasädettä. Odemark julkaisi myös kaavan, jolla laskettavan rakennekerroksen päältä saavutettava kantavuus pystyttiin määrittämään kerroksen paksuuden, jäykkyysmoduulin ja alemman kerroksen kantavuuden perusteella. Analyttiset mitoitusmenetelmät vakiintuivat käyttöön vasta 1980-luvulla, kun tietokoneiden kehitys mahdollisti vaativien laskentaongelmien nopean ratkaisun. Laskentaohjelmien kehitys mahdollisti myös viskoelastisuusteorian käytön, jolloin voitiin ottaa huomioon asfalttibetonin jäykkyysmoduulin riippuvuus kuormitusajasta ja lämpötilasta. Monikerrosrakentamiseen perustuvasta laskennasta on siirrytty sittemmin myös elementtimenetelmän käyttöön, mikä



mahdollistaa yhä monimutkaisempien rakennekokonaisuuksien jännitystilan laskennan ja mallintamisen. (Huang, 2004. Järvinen, 1991b)

Mitoitusmenetelmät voidaan jakaa kahteen ryhmään myös sen perusteella, miten niissä käsitellään mitoituskuormia. Erilaiset kuormien käsittelytavat ovat ekvivalenttipyöräkuormitus (fixed wheel) ja ekvivalenttiakselikuormitus (fixed vehicle / fixed traffic). Ekvivalenttipyöräkuormitukseen perustuvassa mitoituksessa kuormitusakselin pyörät yhdistetään yhdeksi redusoiduksi pyöräkuormaksi (Equivalent Single-Wheel Load, ESWL), jota käytetään mitoituskuormana. Ekvivalenttipyöräkuormitukseen perustuvaa mitoitusta käytetään yleisesti esimerkiksi lentokentillä ja satamissa, joissa kuormituksen suuruus on oleellisempi kuin kuormituskertojen määrä. Ekvivalenttiakselikuormitukseen perustuvaa mitoitusta käytetään tierakenteiden mitoituksessa, jossa kuormituskertojen määrä on tärkeämpi kuin mitoituskuormien suuruus. Mitoittavana kuormana käytetään standardiakselikuormaa (Equivalent Single-Axle Load, ESAL), jonka kuormituskertojen määrä eli kuormituskertaluku saadaan kertomalla akselikuormien kuormituskertojen määrä niiden suuruuden mukaan määräytyvällä vastaavuuskertoimella (Equivalent Axle Load Factor, EALF). Akselikuorman vastaavuuskerroin lasketaan niin sanotulla neljännen potenssin säännöllä akselikuorman ja standardiakselikuorman osamäärän neljäntenä potenssina. Suomessa käytetty standardiakselin paino on 100 kN, kun se esimerkiksi Yhdysvalloissa on 80 kN. Sekä ekvivalenttipyörä- että ekvivalenttiakselikuormituksen teorioissa mitoitus perustuu sykliseen kuormitukseen. (Huang, 2004. Järvinen, 1991a)

Liikennekuormituksen dynaamisesta luonteesta johtuen sitomattomien kerrosten ja pohjamaan materiaaliparametrina käytetään jäykkyysmoduulia, jonka mittaamisessa pyritään simuloimaan syklisiä liikennekuormitusta. Jäykkyysmoduuli lasketaan liikennekuorman aiheuttaman deviatorisen jännityksen ja palautuvan muodonmuutoksen osamääränä. Jännityksen lisääminen kasvattaa karkearakeisen ja alentaa hienorakeisen materiaalin jäykkyysmoduulia. Jäykkyysmoduuli määritetään laboratoriossa kolmiakselialikokeella, jossa jännityksen vaakasuoraa osaa jäljitellään sellipaineen avulla. Jännitystilan ja tiiviystilan lisäksi jäykkyysmoduuli on riippuvainen erityisesti vesipitoisuudesta, mikä pitää ottaa huomioon alempina moduuliarvoina erityisesti roudan sulamisen aikana. Asfalttipäällysteiden jäykkyysmoduulien mittaamiseen laboratoriossa käytetään myös syklisiä kuormitusta. Asfalttipäällysteissä käytetyn bitumin jäykkyys on kuitenkin vahvasti riippuvainen kuormitusajasta ja lämpötilasta. Asfalttipäällysteen jäykkyys on pienempi pitkillä kuormitusajoilla ja korkeissa lämpötiloissa. (Huang, 2004. Järvinen, 1991b) Tässä tutkimuksessa käytetään lähtökohtaisesti sykliseen kuormitukseen perustuvia jäykkyysmoduuleja, ja staattiseen kuormitukseen perustuvien jäykkyysmoduulien käytöstä mainitaan erikseen.

Suomessa tierakenteiden mitoitus on perustunut routasyvyyden perusteella määräytyvään kokonaisrakennepaksuuteen ja kuormituskertaluvun perusteella määräytyvään kokonaiskantavuuteen. Mitoitusarvoina käytetään kuormitustasoltaan eritasoisilta teiltä

mitattuja levykuormituslaitteen kantavuuksia, joiden perusteella eri rakennekerrokset mitoitetaan Odemarkin kantavuuskaavalla. Odemarkin menetelmä on tälläkin hetkellä käytössä sekä tie- että katurakenteiden mitoituksessa. Myös Betonikeskuksen mitoitusohje (2007) raskaasti kuormitetuille betonikivipäällysteille perustuu katuluokituksen perusteella määräytyvään tavoitekantavuuteen. Ensimmäinen analyyttinen mitoitusmenetelmä oli vuonna 1990 julkaistu Neste Oy:n mitoitusmenetelmä, joka on kehitetty Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratoriossa. Vuonna 1994 Neste ja Tielaitos julkaisivat APAS-monikerroslaskentaohjelman, joka laskee jännitykset ja muodonmuutokset eri rakennekerroksille ja niiden kestoiät silloisen Tielaitoksen kokoamien materiaalmallien mukaan. Mitoittavana akselikuormana käytetään suomalaista standardiakselikuormaa. (Järvinen, 1991a)

## **1.2. Ongelmanasettelu**

Vuonna 2003 Vuosaaren sataman rakennemitoitusta (Helsingin Satama, 2005) aloitettaessa jouduttiin kuitenkin miettimään voiko tierakenteiden mitoitusmenetelmiä käyttää satamarakenteiden mitoituksessa, jossa mitoituskuormat ovat huomattavasti suurempia. Helsingin vanhempien satamien rakennemitoitus on tehty luultavasti routa- ja kantavuusmitoituksena, kuten myös vanhemmat tierakenteet. Helsingin kaupunginmuseon internetsivujen (6.4.2011) mukaan Jätkäsaaren ja Sörnäisten satamat otettiin käyttöön jo 1800-luvun lopulla ja ne ovat laajentuneet vähitellen tavaraliikenteen tarpeiden mukaan. Sörnäisten sataman konttiterminaali valmistui vuonna 1963 ja Länsisataman konttiterminaali vuonna 1977. Vuosaaren sataman rakennemitoitus 2000-luvulla tehtiin analyyttisesti, mutta osoittautui, että tierakenteiden analyyttiset mitoitusmenetelmät eivät kuitenkaan olleet suoraan sopivia satamarakenteiden mitoittamiseen.

Tierakenteiden mitoitusmenetelmissä kuormitusta käsitellään ekvivalenttiakselikuormituksen perusteella. Satamien kuormituksille sopiva ekvivalenttipyöräkuormitukseen perustuva teoria on unohdettu Suomessa lähes kokonaan. Satamassa kuormitukset ovat kuitenkin huomattavasti suurempia kuin tieliikenteessä, ja Vuosaaren sataman mitoitusraportin (Helsingin Satama, 2005) mukaan neljännen potenssin sääntöä ei pidetty käyttökelpoisena satama-ajoneuvojen vastaavuuskertoimen määrittämiseen. Sataman tulevat liikennemäärät ovat myös vaikeammin ennustettavissa kuin tiemitoituksessa käytettävät keskivuorokausiliikenteet. Lisäksi sataman toiminnallinen yleissuunnitelma päivittyi suunnittelun edetessä, joten myös mitoituskuormat ja kuormituskertojen määrät muuttuivat jatkuvasti. Kenttäalueilla kuormitukset jakautuvat myös huomattavasti epätasaisemmin kuin tieliikenteessä, jossa mitoitetaan periaatteessa ainoastaan yhtä poikkileikkausta.

Tie- ja kenttäalueiden erilaiset poikkileikkaukset vaikuttavat myös jännitysten jakaantumiseen rakenteessa ja siten myös mitattuihin kantavuuksiin. Laajojen kenttäalueiden rakenteilla on suurempi sivutuki, koska niistä puuttuvat sivuojat ja penkereet. Sivutuen vaikutus on havaittavissa esimerkiksi tierakenteen kantavuusmittauksissa kaistan keskeltä ja ulkourasta mitattujen kantavuuksien erona. Ulkourasta mitatut kantavuudet ovat yleisesti pienempiä kuin kaistan keskeltä mitatut. Erot ovat suuremmat staattisilla kuormituksilla, koska niiden

aiheuttamat jännitykset jakaantuvat sivuttaissuunnassa laajemmalle alueelle kuin dynaamisten kuormien aiheuttamat jännitykset. (Siika, 2006)

Suuremman kuormituksensa lisäksi satamassa käytetyt trukit ja nosturit liikkuvat huomattavasti hitaammin kuin tieliikenneajoneuvot, joten dynaamisten kuormien kuormitusajat ovat pidempiä kuin tieliikenteessä. Sen lisäksi satamarakenteisiin kohdistuu suuret staattiset kuormat niiden päälle kasattavista konttipinoista, joiden kuormitus ei ole mitattavissa kuormituskertojen määrän mukaan. Vuosaaren sataman rakennemitoituksen alkuvaiheessa huomattiin myös, että konttikuormien suuruuksien arviointi on erittäin vaikeaa (Korkiala-Tanttu, 2010). Konttikuormituksen suuruuteen vaikuttavat sekä konttien täyttöaste että niiden pinoamiskorkeus, joten konttikuormitusten suuruus voi vaihdella erittäin paljon pienelläkin alueella.

Staattinen kuormitus aiheuttaa lisäksi ongelman monikerros-laskennassa käytettävien materiaaliparametrien valintaan. Liikennekuormille pohjamaan ja sitomattomien kerrosten materiaaliparametrina käytetään jäykkyysmoduulia, jonka suuruudessa on otettu huomioon kuormituksen dynaamisuus (Korkiala-Tanttu ym., 2004). Asfalttibetonin jäykkyysmoduulin voimakas kuormitusaika- ja lämpötilariippuvuus on myös suuri ongelma, koska suuret staattiset kuormat voivat aiheuttaa pahoja painumia erityisesti kuumina kesäpäivinä. Suuremmat kuormitukset ja rengaspaineet aiheuttavat suurempia pysyviä muodonmuutoksia myös sitomattomiin rakennekerroksiin, joten pohjamaan puristusmuodonmuutoksen sijasta mitoituksen pitäisi perustua rakennekerrosten pysyviin muodonmuutoksiin (Huang, 2004).

Tutkimuksen ongelmanasettelun pääkohdat ja tutkimustarpeet olivat:

- Kuormien suuruuksien ja kuormituskertojen määrän arviointi sekä dynaamisille ajoneuvokuormille että staattisille konttikuormille.
- Redusoidun pyöräkuorman (ekvivalenttipyöräkuormitus) teorian hyödyntäminen.
- Käytetyt mitoituskriteerit ja staattisen kuormituksen huomiointi mitoituskriteereissä.
- Rakennekerrosten pysyvien muodonmuutosten huomiointi.
- Käytetyt rakennekerros-materiaalit ja materiaaliparametrit. Dynaamisille ja staattisille kuormille käytettyjen materiaaliparametrien suhde toisiinsa.

### 1.3. Tavoite ja tutkimusmenetelmät

Tutkimuksen tavoitteina oli selvittää

- maailmalla käytettyjen rakennemitoitusmenetelmien soveltuvuutta Suomeen
- pääkaupunkiseudun raskaasti kuormitettujen kenttien rakennekerrosratkaisut, materiaaaliparametrit, kuormituskestävyys ja vaurioitumisaste.

Kirjallisuustutkimuksessa kiinnitettiin erityisesti huomiota käytettyihin rakennekerrosmateriaaleihin, materiaaaliparametreihin, mitoituskriteereihin ja mitoituskuormiin. Tutkimuksen alussa selvitettiin rakennemitoituksen teorian perusteet, kuten erilaiset kuormitusmuodot, materiaaaliparametrit, rakenteen kestoajan määrittäminen sekä jännitysten ja kriittisten muodonmuutosten määrittämistavat. Perusteoria on lähtökohtana sekä perinteisten tierakenteiden että erikoisrakenteiden, kuten satamien ja muiden raskaasti kuormitettujen kenttärakenteiden mitoituksessa. Perusteorian jälkeen selvitettiin, millä tavalla ja miksi kenttärakenteiden mitoitusta aikanaan kehittyi erilleen perinteisestä tierakennemitoituksesta. Tämän jälkeen tutkittiin, minkälaisia raskaasti kuormitettujen kenttärakenteiden mitoitustutkimusmenetelmiä on nykyään käytössä. Mitoitusmenetelmiä käytettiin lopuksi Vuosaaren sataman rakennekerrosten vaihtoehtoiseen mitoitukseen.

Kokeellinen tutkimus koostui kentällä tehtävistä mittauksista sekä laboratoriokokeista. Tutkimuksen pääkohteet olivat Jätkäsaaren ja Sompasaaren vanhat satamat sekä Tikkurilan linja-autotermiinali, jolle tehtiin myös erillinen vaurioanalyysi Vantaan kaupungin toimeksiantona.

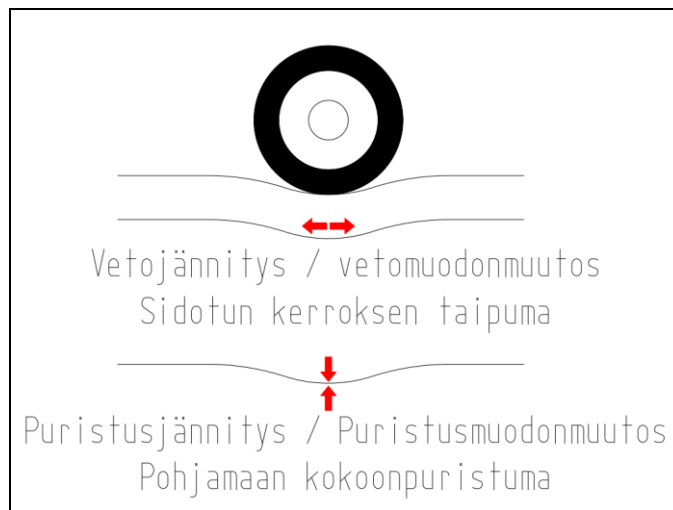
### 1.4. Tutkimuksen rajaukset

Tutkimuksen ulkopuolelle rajattiin lentokenttien mitoitustutkimusmenetelmät lukuun ottamatta mitoitustutkimusmenetelmien kehitystä koskevaa osuutta. Kirjallisuustutkimuksessa käsiteltyjä betonikivirakenteita ei saatu mukaan kokeelliseen tutkimukseen, koska sopivia koekenttiä ei ollut käytettävissä. Paikalla valetut betonipäällysteet rajattiin sen sijaan kokonaan tutkimuksen ulkopuolelle, koska ne on todettu soveltumattomiksi Suomen ilmasto-oloihin ja nastarengaskulutukseen. Kokeellisen tutkimuksen koekohteet jouduttiin lisäksi kustannus- ja aikataulusyistä rajaamaan pääkaupunkiseudun alueelle.

## 2. TIERAKENTEEN MITOITUSPERUSTEET

### 2.1. Jännitykset ja kriittiset muodonmuutokset

Tierakenteiden analyyttinen mitoitus perustuu jännitysten ja kriittisten muodonmuutosten laskennalliseen määrittämiseen elastisuusteorian perusteella. Kriittisinä muodonmuutoksina pidetään yleisesti kuvassa 1 esitettyä vaakasuuntaista vetomuodonmuutosta sidotun kerroksen alapinnassa ja pystysuuntaista puristusmuodonmuutosta pohjamaan yläpinnassa. Muodonmuutokset ovat suhteellisia arvoja ja niiden yksikkönä käytetään yleensä metriä metrille (m/m) eli strainia (s) tai mikrostrainia ( $\mu$ s). Muina mitoituskriteereinä voidaan käyttää sidottujen kerrosten alapinnan taipumaa tai pohjamaan kokoonpuristumaa. Taipumat ja kokoonpuristumat ilmoitetaan absoluuttisina arvoina eli metreinä tai esimerkiksi mikrometreinä.

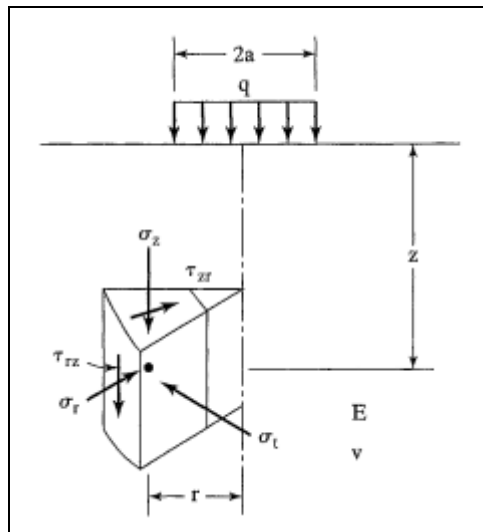


Kuva 1. Jännitykset ja kriittiset muodonmuutokset.

Kirjallisuudessa sekä mitoitusohjeissa ja -ohjelmissa puhutaan muodonmuutosten, taipumien ja kokoonpuristumien yhteydessä usein myös venymistä tai siirtymistä sekä sidotuille että sitomattomille rakennekerroksille. Sitomattomat rakennekerrokset eivät kestä vetojännityksiä, joten niiden yhteydessä on virheellistä puhua venymistä. Taipumia ja kokoonpuristumia kutsutaan usein siirtymiksi. Hooken lain mukaisesti käytetään voima-siirtymä ja jännitys-muodonmuutos -suhteita. Tierakenteiden mitoitus perustuu pyöräkuormituksen voiman aiheuttamaan jännitykseen tien pinnalla, jonka perusteella lasketaan jännitykset ja muodonmuutokset rakennekerroksissa. Tästä syystä siirtymä ei sovellu käsitteenä tierakenteiden mitoitukseen.

Tässä tutkimuksessa käytetään vasteille nimityksiä veto- ja puristusmuodonmuutos, sidotun kerroksen taipuma ja pohjamaan pinnan kokoonpuristuma. Taipumakerroin on kuitenkin yleisesti käytössä oleva määritelmä rakennekerrosten ja pohjamaan kokoonpuristumien määrittämisessä, joten sitä käytetään myös tässä tutkimuksessa.

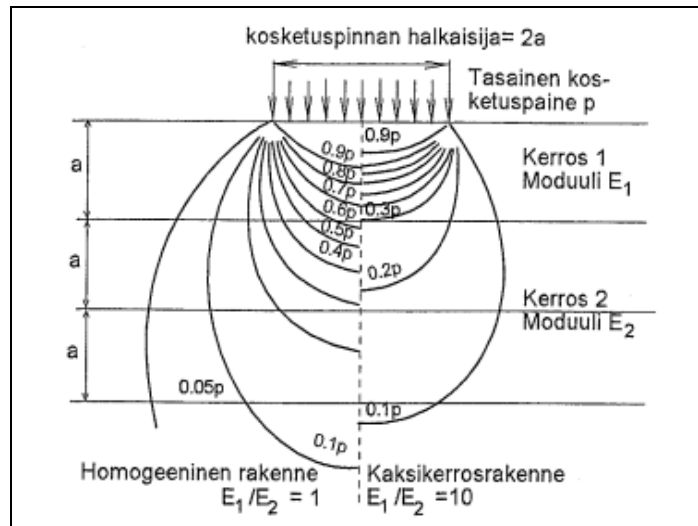
Huangin (2004) mukaan ensimmäisissä mitoitusmenetelmissä jännitykset laskettiin Boussinesqin vuonna 1885 julkaiseman laskentateorian perusteella. Teoria perustuu homogeeniseen yksikerrosrakenteeseen ja pistemäisen kuorman aiheuttamaan jännitykseen, jonka perusteella voidaan laskea muodonmuutokset ja kokoonpuristumat halutulla syvyydellä. Tierakenteiden mitoituksessa käytetään yleisesti ympyrän muotoista kuormituspinta-alaa, joten jännitykset ja vasteet joudutaan lisäksi integroimaan kuormituspinnan ylitse. Boussinesqin kaavat ovat käyttökelpoisia, kun rakennekerroksen ja pohjamaan jäykkysmoduulit ovat lähes yhtä suuria. Jännitysten laskenta syvyydellä  $z$  perustuu kuvan 2 mukaisesti tasaisen kuorman aiheuttamaan pintajännitykseen  $q$ , kuormituspinnan säteeseen  $a$  sekä rakennekerrosmateriaalin jäykkysmoduuliin  $E$  ja Poisson-lukuun  $\nu$ .



Kuva 2. Jännitykset Boussinesqin yksikerrosrakenteelle (Huang, 2004).

Huangin (2004) mukaan vuonna 1954 Foster ja Ahlvin julkaisivat Boussinesqin teoriaan perustuvat diagrammit, joiden avulla voitiin määrittää leikkausjännitys  $\tau$ , kokoonpuristuma  $w$  sekä normaali-jännitykset  $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$ , ja  $\sigma_t$  eri etäisyyksillä  $r$  kuormituksen keskipisteestä. Boussinesqin teorian mukaiset laskentakaavat taipuisan kuormituslevyn alle syntyville jännityksille, muodonmuutoksille ja kokoonpuristumille on esitetty liitteessä A. Tierakenteen kantavuus lasketaan tien pinnan taipuman perusteella Boussinesqin laskentakaavalla. Boussinesqin teoriassa rakennekerrokset eivät deformoidu, joten pohjamaan pinnalle laskettu kokoonpuristuma vastaa päällysteen taipumaa.

Burmister julkaisi vuonna 1943 kaksikerrosteorian ja vuonna 1945 kolmikerrosteorian mukaiset laskentakaavat. Boussinesqin teorian tapaan myös Burmisterin teoriassa rakennekerrokset oletettiin homogeenisiksi, isotrooppisiksi sekä lineaarisesti elastisiksi. Materiaaliparametreina käytettiin jäykkysmoduulia sekä Poisson-lukua. Monikerrosteoriaan perustuvat laskentamenetelmät ovat yksikerrosteorian laskentakaavoja monimutkaisempia, mutta niillä lasketut jännitystilat vastaavat paremmin todellista jännitystilaa. Kuvassa 3 on esitetty jännitysjaakaumat Boussinesqin teorian mukaiselle yksikerrosrakenteelle ja Burmisterin käyttämälle kaksikerrosrakenteelle jäykkysmoduulien suhteella 10.



Kuva 3. Jännitysjaumat yksikerrosrakenteelle ja kaksikerrosrakenteelle (Ehrola, 1996. Alkuperäinen: Hartikainen & Jämsä, 1986).

Monikerrosteorian hyödyntäminen oli kuitenkin turhan työlästä, jotta se olisi vakiintunut yleiseen käyttöön ennen tietokoneiden ja laskentaohjelmien kehittymistä. Monikerroslaskentaa alettiin kuitenkin hyödyntää 1980-luvulla ja viimeistään 1990-luvulla. Nykyään käytössä olevilla elementtimenetelmään perustuvilla ohjelmilla pystytään laskemaan ja mallintamaan yhä monimutkaisempia rakennekokonaisuuksia.

## 2.2. Rakennekerrosmateriaalit ja materiaaliparametrit

### 2.2.1. Sitomattomat kerrokset ja pohjamaa

Huangin (2004) mukaan sitomattomien rakennekerrosten materiaaliparametrina käytettiin aiemmin jännitystilasta riippumatonta jäykkyyssmoduulia. Sitomattomien rakennekerrosten ja pohjamaan jäykkyys riippuu materiaalin jäykkyyssmoduulin lisäksi myös rakennekerroksen jännitystilasta, tiiviyydestä ja vesipitoisuudesta. Vuonna 1968 Huang käytti Burmisterin monikerrosmallia jännitysten laskemiseksi eri rakennekerrosten osissa. Hän jakoi rakenteen seitsemään kerrokseen ja laski jännitykset niiden keskellä. Tämän jälkeen hän laski uudet jännitystilariippuvat jäykkyyssmoduulit pääjännitysten summan perusteella kaavalla

$$E = E_0 \times (1 + \beta \times \theta) \quad (2.1)$$

jossa

- $E$  on jännitystilariippuva jäykkyyssmoduuli
- $E_0$  jäykkyyssmoduuli, kun pääjännitysten summa on 0
- $\theta$  jännitysinvariantti pääjännityksien summasta
- $\beta$  materiaalin jännitystilariippuvuuden vakiokerroin.

Pääjännitysten summa lasketaan rakennekerrosten omasta painosta aiheutuvan hydrostaattisen jännityksen ja liikennekuorman aiheuttaman jännityksen summana kaavalla

$$\theta = \sigma_z + \sigma_r + \sigma_t + \gamma \times z \times (1 + 2 \times K_0) \quad (2.2)$$

jossa

|                      |   |
|----------------------|---|
| $\theta$             | on pääjännitysten summa (kPa)   |
| $\sigma_z$           | pystysuuntainen normaalijännitys (kPa)                                      |
| $\sigma_r, \sigma_t$ | vaakasuuntaiset normaalijännitykset (kPa)                                   |
| $\gamma$             | ylempien rakennekerrosten keskimääräinen tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) |
| $z$                  | laskentasyvyys (m)  |
| $K_0$                | laskentakerroksen materiaalista riippuva lepopaine kerroin (-).             |

Nykyään tierakenteiden mitoituksessa käytetään jäykkyysmoduulia (resilient modulus,  $M_r$ ), joka lasketaan ainoastaan palautuvan muodonmuutoksen perusteella. Sen takia se on tavallisia jäykkyysmoduuleja suurempi. Ehrolan (1996) mukaan toistuvassa dynaamisessa kuormituksessa pysyvät muodonmuutokset kasvavat tiettyyn rajaan asti ja tasaantuvat sen jälkeen eli kuormitus ja pysyvä muodonmuutostaso vakiintuvat. Tierakennekerrosten mitoituksessa käytetty jäykkyysmoduuli kuvaa sitomattomien rakennekerrosten muodonmuutostilanteesta vakiintuneesta kuormitustilanteesta. Jäykkyysmoduuli voidaan mitata laboratoriossa kolmiaksiaalikojeella, jossa haluttu jännitystilasta saadaan aikaiseksi pystysuuntaisella puristusjännityksellä ja vaakasuuntaisella sellipaineella. Kolmiaksiaalikojeen perusteella jäykkyysmoduuli lasketaan deviatorisen jännityksen ja palautuvan suhteellisen muodonmuutoksen suhteena kaavalla

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\varepsilon} = \frac{\sigma_z - \sigma_r}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

jossa

|               |  |
|---------------|--|
| $M_r$         | on jäykkyysmoduuli (MPa)   |
| $\sigma_d$    | deviatorinen jännitys (MPa)  |
| $\sigma_z$    | akksiaalinen eli pystysuuntainen jännitys (MPa)                      |
| $\sigma_r$    | kuormituspinnan säteen suuntainen eli vaakasuuntainen jännitys (MPa) |
| $\varepsilon$ | palautuva suhteellinen muodonmuutos (m/m).                           |

Ehrolan (1996) mukaan tierakenteiden mitoituksessa käytetty jäykkyysmoduuli sitomattomille kerroksille ei ole kuitenkaan materiaaliveko. Moduulin suuruus riippuu materiaalin lisäksi vallitsevasta jännitystilasta, tiiviydestä, vesipitoisuudesta sekä kuormituspulssin amplitudista ja muodosta. Karkearakeisilla kitkamaalajeilla jäykkyysmoduuli kasvaa ja hienorakeisilla koheesiomaalajeilla pienenee jännitystason kasvaessa. Vallitseva jännitystilasta otetaan huomioon kaavoilla



$$M_r = K_1 \times \left( \frac{\sigma_d}{\sigma_{d0}} \right)^{-K_2} \quad \text{hienorakeisilla koheesiomaalajeilla} \quad (2.4)$$

$$M_r = K_1 \times \left( \frac{\theta}{\theta_0} \right)^{K_2} \quad \text{karkearakeisilla kitkamaalajeilla} \quad (2.5)$$

joissa

|               |                             |
|---------------|-----------------------------|
| $M_r$         | on jäykkyysmoduuli (MPa)    |
| $\sigma_d$    | deviatorinen jännitys (MPa) |
| $\sigma_{d0}$ | vertailujännitys, 1,0 MPa   |
| $\theta$      | pääjännitysten summa (MPa)  |
| $\theta_0$    | vertailujännitys, 1,0 MPa   |
| $K_1$         | moduuliluku (MPa)           |
| $K_2$         | moduuliekspONENTTI (-).     |

Pääjännitysten summa lasketaan kaavan 2.2 mukaisesti ja rakennekerroksessa vaikuttava deviatorinen jännitys kaavalla

$$\sigma_d = \sigma_z - 0,5 \times (\sigma_r + \sigma_t) + \gamma \times z \times (1 - K_0) \quad (2.6)$$

jossa

|                      |   |
|----------------------|---|
| $\sigma_d$           | on deviatorinen jännitys (kPa)  |
| $\sigma_z$           | pystysuuntainen normaalijännitys (kPa)                                      |
| $\sigma_r, \sigma_t$ | vaakasuuntaiset normaalijännitykset (kPa)                                   |
| $\gamma$             | ylempien rakennekerrosten keskimääräinen tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) |
| $z$                  | laskentasyvyys (m)  |
| $K_0$                | laskentakerroksen materiaalista riippuva lepopaine kerroin (-).             |

Moduuliluvun  $K_1$  ja moduuliekspONENTIN  $K_2$  arvot riippuvat tarkasteltavasta materiaalista sekä sen tiiviydestä ja vesipitoisuudesta. Taulukossa 1 on esitetty TPPT-tutkimusohjelmassa käytettyjä tyyppiarvoja eri rakennekerroksille.

Taulukko 1. Moduuliluvun ja -eksponentin arvot TPPT-ohjelmassa (Alkio ym., 2001)

| Rakennekerros  | $K_1$  | $K_2$ |
|----------------|--------|-------|
| Kantava kerros | 23 000 | 0,50  |
| Jakava kerros  | 24 000 | 0,49  |
| Suodatinkerros | 17 000 | 0,48  |

Kenttäalueiden kuormitus eroaa kuitenkin tiealueiden kuormituksesta. Kenttäalueilla esiintyy enemmän staattista kuormitusta konttien ja trailereiden säilytyksen takia. Lisäksi liikenne on hitaampaa kuin tieympäristössä, joten myös dynaamisen kuormituksen kuormitusajat ovat

pidempiä. Kuormitusnopeus ja kuormitusaika vaikuttavat eniten hienorakeisilla materiaaleilla varsinkin, jos niiden vesipitoisuus on suuri (Alkio ym., 2001). Karkearakeisilla materiaaleilla vaikutus on vähäisempi.

### 2.2.2. Asfalttibetoni

Asfalttibetonin jäykkyyttä kuvaavat erilaiset moduulin arvot ovat

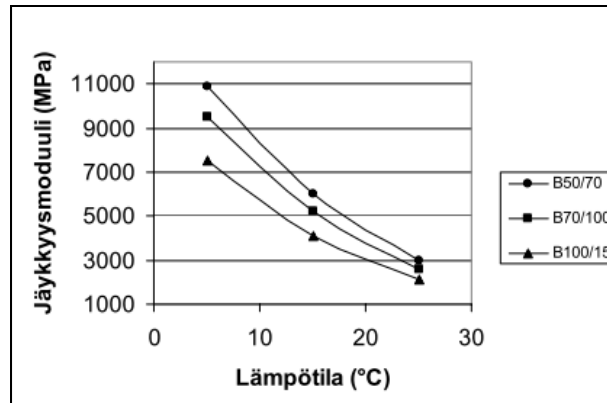
- jäykkyyshmoduuli  $S_m$  (stiffness modulus)
- dynaaminen moduuli  $|E^*|$  (dynamic (stiffness) modulus)
- kompleksinen moduuli  $E^*$  (dynamic complex modulus).

Asfalttibetonin materiaaliparametrina käytetään yleensä jäykkyyshmoduulia, johon viitataan tässä tutkimuksessa myös symbolilla  $E$ . Jäykkyyshmoduuli mitataan standardin SFS-EN 12697-26 (2004) mukaisesti dynaamisella menetelmällä, jossa koekappaletta kuormitetaan viidellä peräkkäisellä kuormituspulssilla. Suomessa käytetty menetelmä on epäsuora vetokoe, jossa kuormitetaan kyljellään olevaa sylinterinmuotoista näytettä sen säteen suuntaisesti. Koejärjestely on esitetty tämän tutkimuksen kuvassa 41 kappaleessa 5.2.3. Kuormitushetkellä mitataan kuormitusta vastaan kohtisuorat muodonmuutokset kahdella siirtymäanturilla. Jäykkyyshmoduuli lasketaan mitattujen palautuvien muodonmuutosten keskiarvon perusteella. Kuormitus ja sen aiheuttama jännitys eivät vastaa kuitenkaan todellista kuormitustilannetta, jossa kuorma kohdistuu kuvitteelliseen sylinterinäytteeseen kohtisuorassa suunnassa sen sädetä vastaan. Kokeen dynaamisesta luonteesta huolimatta Suomessa käytettyä asfalttibetonin jäykkyyshmoduulia ei pidä sekoittaa asfalttibetonin dynaamiseen moduuliin.

Yhdysvalloissa on kehitetty todellista kuormitusta paremmin vastaava suoraan puristusjännitykseen perustuva dynaamisen moduulin  $|E^*|$  koe, joka suoritetaan useassa lämpötilassa eri kuormitustajuuksilla. Kokeen avulla pystytään määrittämään asfalttipäällysteen tyypikäyrä (master curve), joka kuvaa dynaamisen moduulin arvoa eri lämpötiloissa ja kuormitusajoilla. Yhdysvalloissa tehdyssä tutkimuksessa (Loulizi ym., 2005) todettiin, että asfalttibetonin jäykkyyshmoduuli ja dynaaminen moduuli vastaavat lähes toisiaan kokeiden kuormitusaikojen ollessa samat. Tavalliselle asfalttibetonille mitatut dynaamiset moduulit olivat noin 7 % suurempia kuin tavalliset jäykkyyshmoduulit.

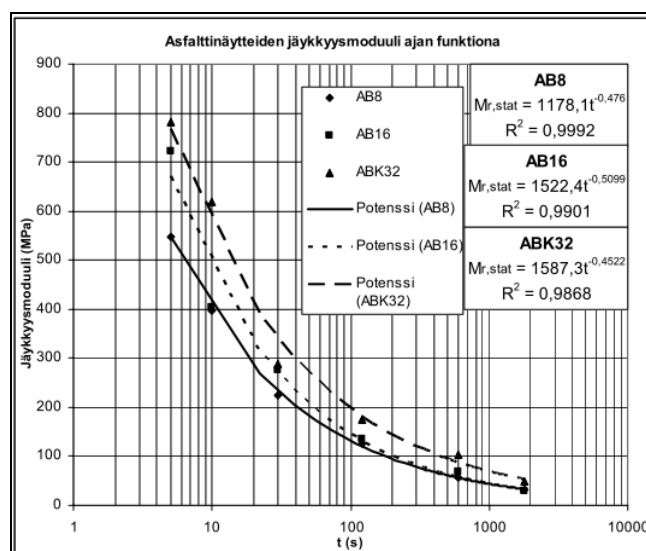
Aalto-yliopiston tie- ja liikennetekniikan tutkimusryhmässä tehtiin kandidaatintyö (Suhonen, 2010) dynaamisen moduulin mittaamisesta. Laboratoriokokeissa suora puristusjännitys aiheutti koekappaleisiin suuret pysyvät muodonmuutokset, mikä koettiin ongelmaksi. Työssä todettiin, että eurooppalaiseen standardiin perustuva suora veto-puristuskoe saattaisi sopia paremmin suomalaisille päällystemassoille. Veto-puristuskokeessa muodonmuutokset palautuvat pääasiassa vetovaiheessa. Kokeella määritetään asfalttibetonin kompleksinen moduuli  $E^*$ , joka ilmoitetaan kompleksilukuna todellisen osan ja imaginääriosan avulla. Dynaaminen moduuli on kompleksisen moduulin itseisarvo.

Asfalttibetonin sideaineena käytetyn bitumin jäykkyys on riippuvainen sekä kuormitusajasta että lämpötilasta, mikä vaikuttaa voimakkaasti myös asfalttibetonin jäykkyysmoduuliin eri olosuhteissa. Kuvassa 4 on esitetty epäsuoralla vetokokeella kuormitusajalla 0,1 s mitattuja asfalttibetonin jäykkyysmoduuleita eri lämpötiloissa.



Kuva 4. Dynaamisella menetelmällä kuormitusajalla 0,1 s mitattuja asfalttibetonin jäykkyysmoduuleita eri lämpötiloissa (Siika, 2006).

Asfalttibetonin jäykkyysmoduulin riippuvuutta kuormitusajasta voidaan tyypikäyrän lisäksi kuvata myös staattisella menetelmällä mitatuilla staattisilla jäykkyysmoduuleilla. Staattinen mittausmenetelmä on kuvattu EVTEK-ammattikorkeakoulussa tehdyssä opinnäytetyössä (Siika, 2006). Mittausmenetelmän periaate vastaa menetelmän PANK-4207 (1995) mukaista staattista virumiskoetta, mutta eri kuormitusajoilla. Menetelmässä staattinen jäykkyysmoduuli määritetään pysyvän muodonmuutoksen perusteella. Kuvassa 5 on esitetty staattisella menetelmällä 21 °C lämpötilassa mitattuja asfalttibetonin staattisia jäykkyysmoduuleita eri kuormitusajoilla. Tämän tutkimuksen kannalta erityisesti kuormitusajalla on merkitystä, koska satamissa ja muilla raskaasti kuormitetuilla kentillä on paljon staattista kuormitusta.



Kuva 5. Staattisella menetelmällä 21 °C lämpötilassa mitattuja asfalttibetonin staattisia jäykkyysmoduuleita eri kuormitusajoilla (Siika, 2006).

### **2.2.3. Erikoispäällysteet**

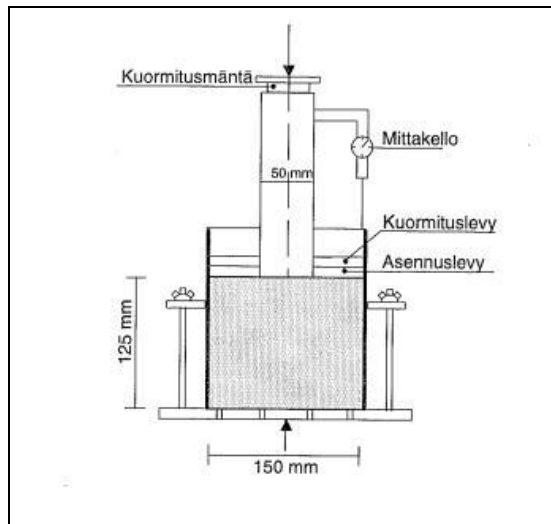
Raskaasti kuormitettujen kenttien suurempien kuormitusten takia päällystemateriaaleille asetetaan kovemmat vaatimukset kuin tiepäällysteille. Kentillä käytetään yleensä jäykempiä päällysteitä, jotka valmistetaan käyttämällä jäykempiä bitumeja, polymeerimodifioituja bitumeja tai komposiittipäällystettä. Vuosaaren sataman (Helsingin Satama, 2005) jäykemmissä asfalttikerroksissa suunniteltiin käytettäväksi jäykempää bitumia B20/30, mutta se korvattiin lopullisissa suunnitelmissa pehmeämmän B50/70 -bitumin ja luonnonasfaltin eli gilsoniitin sekoituksella. Polymeerimodifioitua bitumia käytettiin esimerkiksi vuonna 2004 valmistuneen Hampurin sataman konttiterminaalin päällystämässä (Nynas Bitumen). Jäykkyyden lisäämiseksi voidaan hyödyntää myös asfaltin ja betonin yhdistelmää eli komposiittiasfalttia, jota käytettiin Kotkan sataman päällystämiseen. Lemminkäisen esitteen (lähdeluettelossa) mukaan komposiittiasfaltti koostuu ensin levitettävästä ja tiivistettävästä avoimesta asfaltista. Jäähtyneen avoimen asfaltin päälle pumpataan komposiittilaasti, joka käsitellään lastoilla avoimen asfaltin huokosten täyttämiseksi ja pinnan tasoittamiseksi. Asfalttipäällysteiden lisäksi kentillä voidaan käyttää myös betonista sidekiveä päällystemateriaalina. Betonikeskuksella (2007) on raskaan liikenteen päällysteratkaisujen mitoitusohje betonikivipäällysteille, joka perustuu katuluokan perusteella määräytyvään kokonaiskantavuuteen.

## **2.3. Kantavuus**

### **2.3.1. Pohjamaan kantavuus - CBR-koe**

Tierakenteiden mitoituksessa pohjamaan kantavuutena (bearing capacity) käytetään pohjamaan materiaalin jäykkyysmoduulia, joka mitataan kolmiakselikokeella. Aiemmin kantavuusarvo määritettiin CBR-kokeella, jossa mitataan materiaalin suhteellinen kantavuus. Yoderin ja Witczakin (1975) mukaan CBR-koe kehitettiin vuosina 1928 - 1929 Kaliforniassa. Kokeen kehittämiseksi ja vertailuarvon löytämiseksi suoritettiin useita kantavuuskokeita murskatuilla tierakennemateriaaleilla, joiden keskiarvotulosten perusteella määrättiin 100 % CBR-arvoa vastaava standardimateriaali. Suomessa standardimateriaalina pidetään yleensä murskattua kalkkikivimursketta (Ehrola, 1996).

CBR-kokeessa käytetty laitteisto on esitetty kuvassa 6. Ehrolan (1996) mukaan CBR-kokeessa noin 4,5 kg (10 lb) tutkittavaa maanäytettä laitetaan halkaisijaltaan 150 mm:n sylinteriin. Maanäyte tiivistetään siihen tiiveyteen ja vesipitoisuuteen, missä se tulee tierakenteessa olemaan. Jännitystilaa pyritään simuloimaan maanäytteen päälle asetettavan kuormituslevyn avulla. Maanäytettä kuormitetaan vakionopeudella 1,25 mm/min mäännällä, jonka halkaisija on 50 mm. Kokeen kuluessa mitataan paineet, jotka vastaavat painuma-arvoja 0,63, 1,25, 1,88, 2,5, 3,75, 5, 7,5, 10 ja 12,5 mm. Tuloksista muodostetaan paineen kuvaaja painuman funktiona. Painuma-arvoja 2,5 mm ja 5 mm vastaavat paineen arvot luetaan kuvaajalta ja määritetään niiden prosenttiosuus standardimateriaalin painearvosta. Prosenttiosuuksista suurempi valitaan CBR-arvoksi. Tutkittavan materiaalin maksimiraekoko joudutaan rajaamaan noin 30 mm:iin, joten koemenetelmä sopii huonosti esimerkiksi Suomessa esiintyvien moreenien kantavuuden määrittämiseen.



Kuva 6. CBR-kokeessa käytetty laitteisto (Ehrola, 1996. Alkuperäinen: Hentilä ym., 1994).

CBR-arvo on vain suhteellinen arvo eikä se kuvaa suoraan maa-aineksen kantavuutta tai muodonmuutosominaisuuksia. Ehrolan (1996) mukaan kansainvälisesti on tehty kuitenkin useita kokeellisia tutkimuksia, joissa on määritetty CBR-arvojen vastaavuuksia samoista materiaaleista määritettyihin jäykkyysmoduuleihin.

Tässä tutkimuksessa käsitellyissä englantilaisen Interpaven (2007) ja Ruotsin betoniyhdistyksen (Silfwerbrand, 2005) mitoitusmenetelmissä sekä australialaisessa HIPAVE-mitointiohjelmassa (Wardle ym., 2007) on käytetty vastaavuutta

$$M_r (\text{MPa}) = 10 \times \text{CBR} \quad (2.7)$$

Asphalt Institutin (2006) mitoitusmenetelmässä on käytetty vastaavuutta

$$M_r (\text{MPa}) = 10,3 \times \text{CBR} \quad (2.8)$$

joissa

$M_r$  on materiaalin jäykkyysmoduuli (MPa)

CBR materiaalin CBR-arvo (%).

Kaava 2.7 on yleisimmin käytetty jäykkyysmoduulin laskemiseksi CBR-arvon perusteella, mutta se ei kuitenkaan sovi kaikille materiaaleille. Aalto-yliopiston tietekniikan kursseilla jäykkyysmoduuleja on määritetty CBR-arvojen perusteella harjoitustehtävänä ja opiskelijoiden laskemat moduulit ovat vaihdelleet hyvinkin paljon. Aalto-yliopistossa on tehty myös standardinmukaisia CBR-kokeita, joissa CBR-arvot ovat vaihdelleet merkittävästi jopa samalla materiaalilla (Valtonen, 2011). Tästä syystä muuntokaavoja käytettäessä pitää arvioida tuloksen järkevyyttä sekä CBR-kokeen ja muuntokaavan soveltuvuutta testimateriaalin jäykkyysmoduulin määrittämiseen.

### 2.3.2. Tierakenteen kokonaiskantavuus

Tierakenteen kokonaiskantavuus (structural capacity) tarkoittaa pohjamaan ja rakennekerrosten yhteistä kykyä vastustaa muodonmuutosta kuormitustilanteessa, joten käsitteenä se eroaa esimerkiksi geotekniikassa käytetystä geoteknisestä kantokyvystä. Järvisen (1991) mukaan kantavuus ilmoitetaan joko E-moduulina tai tietyn kuorman aiheuttamana tien pinnan taipumana. Kantavuuden mittaamenetelmiä ovat

- pudotuspainolaite - dynaaminen kuormitus
- levykuormituslaite - staattinen kuormitus
- Benkelman-palkki - staattinen tai dynaaminen kuormitus
- jatkuvat menetelmät - pisteittäinen mittaaminen esimerkiksi liikkuvaan autoon kiinnitetyllä Benkelman-palkilla.

Kantavuuden laskenta perustuu liitteessä A esitettyyn Boussinesqin yksikerrosteorian mukaiseen kaavaan pystysuuntaiselle kokoonpuristumalle syvyydellä  $z = 0$ , joka vastaa päällysteen taipumaa yksikerrosteoriassa. Tanskalainen Ullidtz (1987) käytti Boussinesqin yksikerrosteoriaa kantavuuden laskemiseen pudotuspainolaitteella mitatun taipuman perusteella kaavalla

$$E = \frac{1,5 \times q \times a}{s} \quad (2.9)$$

jossa

|   |   |
|---|---|
| E | on kantavuus (MPa)                      |
| s | taipuma kuormituslevyn alla (m)         |
| q | pintajännitys kuormituslevyn alla (MPa) |
| a | kuormituspinnan säde (m).               |

Kerroin 1,5 vastaa Poisson-luvun arvoa 0,5, vaikka periaatteessa kaikille rakennekerrosmateriaaleille luku on pienempi. Laskentakaava on kuitenkin tarkoitettu taipuisan kuormituslevyn tasaiselle kuormitukselle, kun kantavuusmittauslaitteissa käytetyt osittain jäykät kuormituslevyt aiheuttavat epätasaisen kuormituksen. Kertoimen 1,5 käyttö on perusteltua, koska se korjaa epätasaisen kuormituksen aiheuttamaa vääristymää oikeaan suuntaan (Stubstad ym., 2006).

Tierakenteiden ja tässä tutkimuksessa käsiteltävien kenttärakenteiden kantavuudet eroavat toisistaan, koska kenttäalueilta puuttuvat sivuojat ja tieluiskat. Siten kenttärakenteilla on suurempi sivuttainen tuki ja jännitykset jakautuvat sivuttaissuunnassa suuremmalle alueelle. Kantavuuserot ovat suuremmat staattisilla menetelmillä mitattuina, koska niissä kuormituksen aiheuttama jännitys jakaantuu suuremmalle alueelle kuin lyhytaikaisessa dynaamisessa kuormituksessa.

## 2.4. Mitoituskuormat

### 2.4.1. Ekvivalenttiakselikuormitus

Perinteinen tierakennemitoitus perustuu ekvivalenttiakselikuormitukseen (fixed vehicle / fixed traffic) eli standardiakseliin (Equivalent Single-Axle Load, ESAL). Eripainoisten ajoneuvojen kuormitusmäärä muutetaan standardiakseleiksi niille laskettavien vastaavuuskertoimien (Equivalent Axle Load Factor, EALF) avulla. Mitoitus perustuu standardiakseleiden kuormituskertojen määrään eli kuormituskertalukuun. Huangin (2004) mukaan vastaavuuskertoimen määrittäminen tapahtui aluksi akselikuorman aiheuttaman päällysteen alapinnan vetomuodonmuutoksen perusteella. Myöhemmin vastaavuuskertoimet päätettiin määrittää suoraan akselikuorman suuruuden perusteella, koska kuorman katsottiin olevan suoraan verrannollinen sen aiheuttamaan vetomuodonmuutokseen. Vuosina 1958 - 1960 tehtyjen AASHO:n tiekoekokeiden perusteella määritettiin niin sanotun neljännen potenssin säännön mukainen laskentakaava vastaavuuskertoimelle

$$EALF = \left( \frac{L}{L_0} \right)^4 \quad (2.10)$$

jossa

|                |   |
|----------------|---|
| EALF           | on tarkasteltavan akselin vastaavuuskerroin (-) |
| L              | tarkasteltava akselikuorma (kN)                 |
| L <sub>0</sub> | standardiakselikuorma (kN).                     |

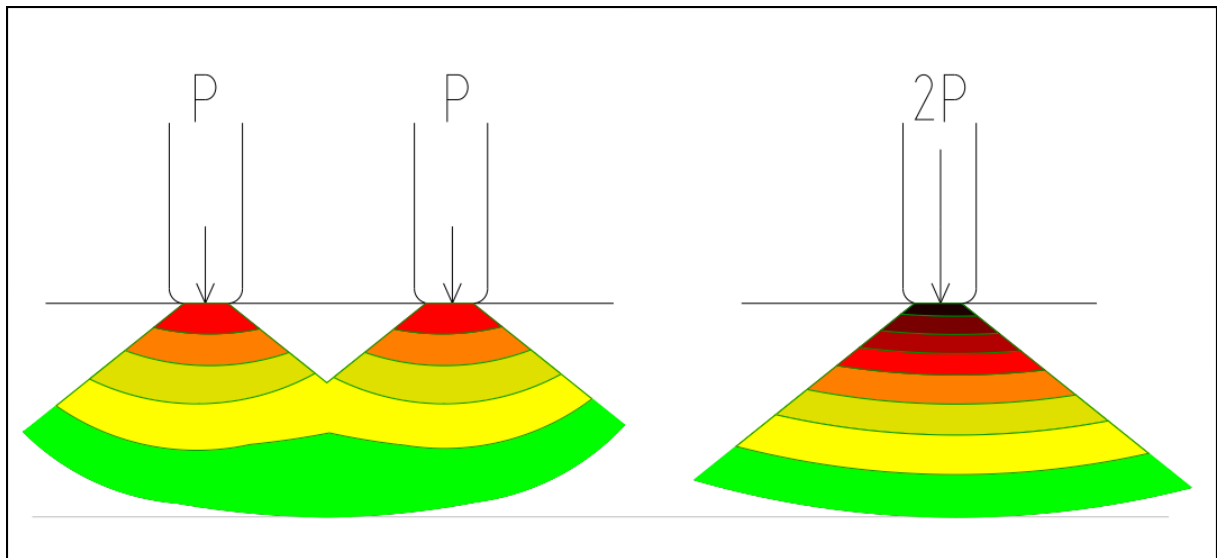
Yhdysvalloissa standardiakselin kuorma on 80 kN ja Suomessa 100 kN. Vastaavuuskertoimet voidaan laskea myös standardipyöräkuorman perusteella erisuuruisille pyöräkuormille, jolloin Suomessa käytetään 50 kN standardipyöräkuormaa. Neljännen potenssin sääntö on tarkoitettu normaaleille tieliikenneajoneuvoille ja nimenomaan asfalttipäällysteille, joten sen soveltuvuutta jouduttiin arvioimaan esimerkiksi Vuosaaren sataman rakennemitoitusta tehtäessä (Helsingin Satama, 2005).

### 2.4.2. Ekvivalenttipyöräkuormitus

Ekvivalenttipyöräkuormitukseen (fixed wheel) perustuvaa mitoitusmenetelmää käytetään esimerkiksi lentokentillä, satamissa ja muilla raskaasti kuormitetuilla kenttäalueilla, joilla kuormat ovat suuria. Mitoituksessa akselin pyörät yhdistetään redusoiduksi pyöräkuormaksi (Equivalent Single-Wheel Load, ESWL), jota käytetään mitoittavana pyöräkuormana. Mitoitustavassa kuormien suuruudella on suurempi vaikutus kuin ekvivalenttiakselikuormituksen mitoitusmenetelmässä, jossa kuormituskertojen määrä vaikuttaa enemmän.

Yoderin ja Witzakin (1975) mukaan ekvivalenttipyöräkuormitukseen perustuva mitoitusmenetelmä otettiin käyttöön toisen maailmansodan aikana, kun Yhdysvalloissa kehitettiin paripyörillä varustetut B-29 -pommikoneet. Paripyörän käyttö pienentää jännityksiä erityisesti ylemmissä rakennekerroksissa, koska kuormitus jakaantuu useammalle pyörälle ja laajemmalle alueelle.

Pari- tai monipyörän vaikutus vähenee jännitysten päällekkäisyyden takia alemmissa rakennekerroksissa. Pari- tai monipyörät ovat kuitenkin rakennemitoituksen kannalta ongelmallisia, minkä takia ne pitää yhdistää joko saman jännityksen tai muodonmuutoksen aiheuttavaksi yksikköpyöräksi eli redusoiduksi pyöräkuormaksi. Jännitysjakaumien erot pari- ja yksikköpyöräkuormilla on esitetty kuvassa 7. Ekvivalenttipyöräkuormitus ja redusoidun pyöräkuorman teoria on tämän tutkimuksen kannalta erittäin tärkeä ja sitä käsitellään jatkossa kappaleessa 3.2.



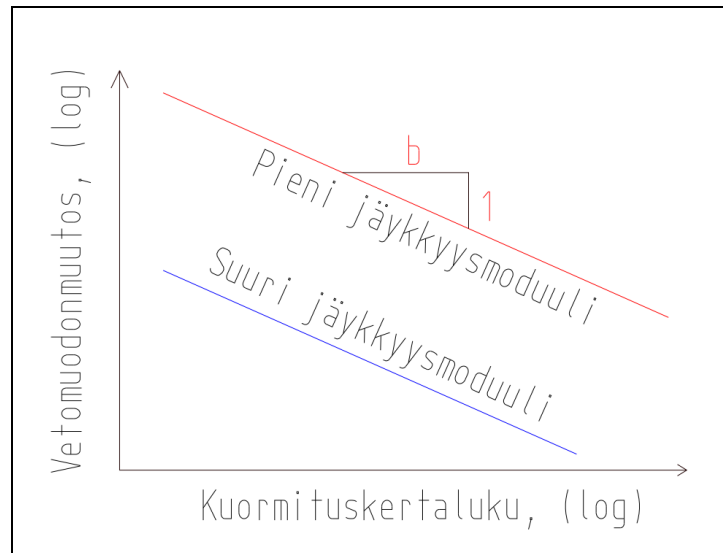
Kuva 7. Jännitykset pari- ja yksikköpyöräkuormilla.

## 2.5. Kuormituskestävyysmitoitus

Analyttisessä tierakenteiden mitoituksessa tierakenteen kestoikä määräytyy päällysteen alapinnan vetomuodonmuutoksen ja pohjamaan yläpinnan puristusmuodonmuutoksen perusteella. Järvisen (1991b) mukaan toistuvien kuormitusten aiheuttama vetojännitys aiheuttaa päällysteen alapinnassa kasvavan muodonmuutoksen, koska asfalttipäällysteen jäykkyysmoduuli pienenee kuormitusten lisääntyessä. Ilmiötä kutsutaan väsymiseksi, minkä takia kuormituskestävyysmitoitusta kutsutaan usein myös väsymismitoitukseksi.

Asfalttipäällysteen kestoajan määrittäminen perustuu laboratoriossa tehtäviin väsymiskokeisiin, joissa määritetään asfalttibetonin sallittu kuormituskertojen määrä eri muodonmuutostasoilla. Muodonmuutokset esitetään kuormituskertojen määrän eli kuormituskertaluvun funktiona. Logaritmiseen asteikkoon piirrettynä tulokset asettuvat suoralle, jota kutsutaan asfalttibetonin väsymissuoraksi. Väsymiskoe tehdään yleensä asfalttibetonipalkin jaksottaisena taivutusvetokokeena, jossa mitataan muodonmuutosta maksimijännityksen pysyessä vakiona. Väsymisen kriteerinä käytetään jännityksen aiheuttamaa suurinta muodonmuutosta. Koe suoritetaan eri maksimijännityksillä, jolloin saadaan selville sallittujen kuormituskertojen määrä eri muodonmuutostasoilla. Muodonmuutosten ja niille sallittujen kuormituskertojen määrän perusteella voidaan määrittää kuvassa 8 esitetyt väsymissuorat.





Kuva 8. Väsymissuorat.

Analyttinen tierakennemitoitus perustuu olemassa oleviin väsymissuoriin ja niiden perusteella määritettyihin materiaaliparametreihin  $b$  ja  $k$ . Järvisen (1991b) mukaan materiaaliparametri  $b$  voidaan rinnastaa neljännen potenssin säännössä käytettyyn potenssilukuun, joka kuvaa tietyn kuorman aiheuttaman suhteellisen rasituksen suuruutta. Se määritetään väsymissuoran kulmakertoimen käänteislukuna. Materiaaliparametri  $k$  kuvaa kuormituskertaluvun suuruutta muodonmuutoksen arvolla 1. Sallittu kuormituskertojen määrä lasketaan kaavalla

$$N = k \times \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)^b \quad (2.11)$$

jossa

|               |   |
|---------------|---|
| $N$           | on sallittujen kuormituskertojen määrä (kpl)                        |
| $\varepsilon$ | vetomuodonmuutos päällysteen alapinnassa ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) |
| $b, k$        | materiaalin perusteella määräytyvät parametrit (-).                 |

Pohjamaan puristusmuodonmuutokseen perustuva kuormituskestävyysmitoitus perustuu pohjamaan materiaalin jäykkyysmoduuliin ja koeteiden tutkimuksiin. Pohjamaan materiaaleilla on olemassa myös niiden kuormituskestävyyttä kuvaavat suorat, joita kutsutaan usein myös väsymissuoriksi. Pohjamaan ja sitomattomien kerrosten tapauksessa on kuitenkin virheellistä puhua väsymisestä. Pohjamaan kuormituskestävyysmitoituksessa käytetyt suorat ovat asfalttipäällysteen suoria jyrkempiä, koska sitomattomien materiaalien muodonmuutokset riippuvat voimakkaammin kuormituskertojen määrästä.

Kuten kappaleissa 2.2.1 ja 2.2.2 todettiin, sekä pohjamaan jäykkyysmoduuli että asfalttibetonin jäykkyysmoduuli riippuvat voimakkaasti olosuhteista. Asfalttibetonin jäykkyys on voimakkaasti riippuvainen lämpötilasta ja pohjamaan jäykkyysmoduuli materiaalin

vesipitoisuudesta. Tämän takia asfalttibetonin vetomuodonmuutokset ja pohjamaan puristusmuodonmuutokset sekä sallitut kuormituskertojen määrät vaihtelevat vuodenajan mukaan. Sallitut kuormituskertojen määrät lasketaan yhdelle vuodelle eri vuodenaikoina, joista rakenteen kestoikä määritetään Minerin lain mukaisella kaavalla

$$v \times \sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (2.12)$$

jossa

|       |  |
|-------|--|
| v     | on rakenteen kestoikä vuosina                |
| $n_i$ | vuodenajan i kuormituskertaluku              |
| $N_i$ | sallittu kuormituskertaluku vuodenaikalle i. |

## 2.6. Suomessa käytetyt mitoitusmenetelmät

### 2.6.1. Odemarkin menetelmä

Hartikaisen (1989) mukaan Odemark julkaisi vuonna 1949 analyyttisen rakennemitoitusmenetelmän, jossa monikerrosrakenne yksinkertaistettiin Burmisterin teorian mukaiseksi kaksikerrosrakenteeksi. Odemark teki yksinkertaistuksia myös alkuperäiseen kaksikerrosteoriaan, joilla hän helpotti mitoitusyhtälöiden matemaattista ratkaisua. Jännitysten ja muodonmuutosten laskenta perustui Boussinesqin teoriaan. Rakennekerrokset yhdistettiin toisiinsa alhaalta ylöspäin, ja yhdistetyn rakennekerroksen jäykkyysmoduuli määräytyi alkuperäisten kerrosten jäykkyysmoduulien perusteella niiden paksuuksien suhteessa. Odemarkin menetelmää on kutsuttu usein myös ekvivalenttimenetelmäksi, koska siinä kahdelle erilaiselle kerrosmateriaalille pyritään löytämään niitä vastaava ekvivalenttimateriaali. Korvaavan materiaalin kerrospaksuus määritetään kaavalla

$$h_2 = n \times h_1 \times \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} \quad (2.13)$$

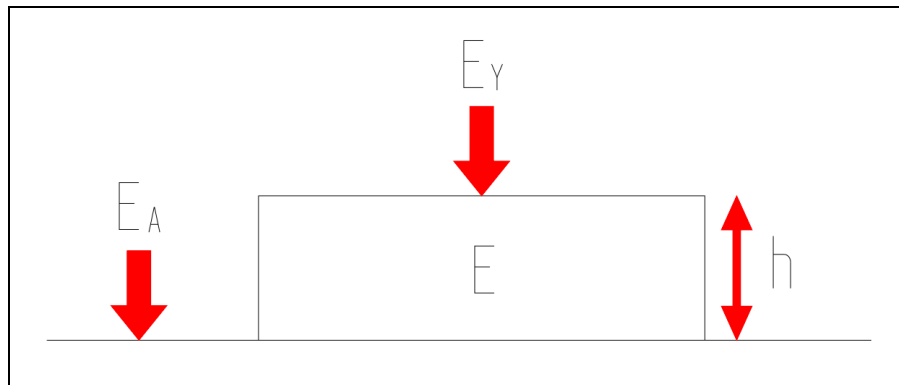
jossa

|       |  |
|-------|--|
| $h_2$ | on korvaavan materiaalin kerrospaksuus (mm)    |
| $h_1$ | alkuperäinen kerrospaksuus (mm)                |
| $E_2$ | korvaavan materiaalin jäykkyysmoduuli (MPa)    |
| $E_1$ | alkuperäisen materiaalin jäykkyysmoduuli (MPa) |
| n     | korjauskerto (lähtökohtaisesti $n = 1$ ).      |

Järvisen (1991) mukaan mitoituskriteereinä käytettiin pystysuuntaista puristusjännitystä pohjamaan pinnalla ja tien pinnan taipumasädettä. Sallittu puristusjännityksen arvo määräytyi varmuuskertoimella kerrotun pohjamaan materiaalin puristuslujuuden mukaan ja taipumasäde

mitoitettavan tierakenteen tieluokan mukaan. Laskennallinen puristusjännitys ei saanut ylittää sallittua jännitysarvoa ja laskennallinen taipumasäde alittaa sallittua taipumasädettä.

Odemark kehitti myös kantavuusyhtälön, jota käytetään vielä nykyään tie- ja katurakenteiden mitoittamiseen Suomessa (Tiehallinto, 2004). Myös Betonikeskuksen (2007) mitoitusohje raskaasti kuormitetuille betonikivipäällysteille perustuu katuluokan perusteella määräytyvään Odemark-kantavuuteen. Kantavuudet ovat vertailukohteista mitattuja levykuormituslaitteen kevätkantavuuksia. Laskenta perustuu kuvassa 9 esitettyihin parametreihin. Ylemmän kerroksen päältä saavutettava kantavuus  $E_Y$  lasketaan alemman kerroksen kantavuuden  $E_A$  sekä mitoitettavan kerroksen jäykkyysmoduulin  $E$  ja sen paksuuden  $h$  perusteella.



Kuva 9. Odemarkin kantavuuslaskennassa käytetyt parametrit.

Laskenta etenee pohjamaan pinnalta kerroksittain päällysteen pinnalle. Kerrokset yhdistetään Odemarkin ekvivalenttisyhtälön avulla. Sitomattomat kerrokset jaetaan paksuudeltaan 150 - 300 mm kerroksiin. Sidotut kerrokset käsitellään yhtenä kerroksena ja niiden jäykkyysmoduuli määritetään yhdistettyjen kerrosten moduulien kerrospaksuuksilla painotettuna keskiarvona. Kantavuus lasketaan kaavalla

$$E_Y = \frac{E_A}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \times \left(\frac{h}{a}\right)^2}}\right) \times \frac{E_A}{E} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \times \left(\frac{h}{a}\right)^2 \times \left(\frac{E}{E_A}\right)^{2/3}}}} \quad (2.14)$$

jossa

|       |  |
|-------|--|
| $E_Y$ | on kantavuus mitoitettavan kerroksen päältä (MPa)  |
| $E_A$ | kantavuus mitoitettavan kerroksen alta (MPa)       |
| $E$   | mitoitettavan kerroksen jäykkyysmoduuli (MPa)      |
| $h$   | mitoitettavan kerroksen paksuus (m)                |
| $a$   | levykuormituslaitteen kuormituspinnan säde 0,15 m. |

Odemarkin menetelmän heikkoutena on mitoituksen perustuminen pelkkään kokonaiskantavuuteen. Mitoituksessa ei oteta huomioon kuormituksen aiheuttamia jännityksiä ja muodonmuutoksia eikä myöskään materiaalien jäykkyysmoduulien jännitystilariippuvuutta. Mitoituksessa ei myöskään oteta huomioon materiaalien erilaisia väsymisominaisuuksia eikä väsymiskestävyyden riippuvuutta kuormitusolosuhteista, kuten lämpötilasta, vesipitoisuudesta ja kuormitusajasta.

Odemarkin mitoituskaavaa käytettäessä joudutaan käyttämään myös jäykkyysmoduulin arvoja, jotka eivät vastaa todellisia arvoja. Odemarkin laskentakaava perustuu Boussinesqin yksikerrosteoriaan, jossa rakennekerroksille ei oleteta deformaatiota ja tien pinnan taipuma vastaa pohjamaan kokoonpuristumaa. Tämä aiheuttaa ongelman kokoonpuristumattomilla alusrakenteilla, koska Odemark laskenta etenee pohjamaan pinnalta ylöspäin. Esimerkiksi kalliopohjalle joudutaan käyttämään laskennallisesti määritettyä 280 MPa kantavuutta, jolla laskennallinen kokonaiskantavuus vastaa levykuormituslaitteella mitattua kantavuutta.

Ylemmän ja alemman kerroksen jäykkyysmoduulien suhteelle joudutaan asettamaan myös rajoituksia, koska todellisuudessa heikolla alusrakenteella päällimmäistä kerrosta ei pystytäkään tiivistämään riittävän tehokkaasti. Liian suuren jäykkyysmoduulin käyttö heikomman kerroksen päällä aiheuttaa myös laskennallisten vetojännitysten syntymisen päällimmäiseen rakennekerrokseen, joita sitomattomat rakennekerrokset eivät todellisuudessa kestä.

#### **2.6.2. APAS-monikerroslaskenta**

Analyyttinen tierakenteiden mitoitus on perustunut Suomessa 1990-luvun alussa kehitettyyn APAS -monikerroslaskentaohjelmaan (Pienimäki, 2004). Neste Oy julkaisi vuonna 1994 ohjelman ensimmäisen version, jossa lähtötietoina käytettiin Nesteen ja silloisen Tielaitoksen kokoamaa materiaalitietokantaa. Tielaitos ja Nesteen seuraaja Fortum jatkoivat ohjelman kehittämistä ja toinen versio julkaistiin vuonna 1997. Tiehallinto antoi ohjelman jatkokehityksen VTT:n tehtäväksi ja kolmas sekä samalla viimeinen versio julkaistiin vuonna 2004. APAS:in etuna Odemarkin menetelmään verrattuna on jännitysten ja muodonmuutosten laskennallinen määrittäminen erityisesti sidotun kerroksen alapinnalla ja pohjamaan pinnalla. Viimeisin APAS-versio ottaa huomioon myös sidottujen kerrosten jäykkyysmoduulien lämpötilariippuvuuden ja sitomattomien kerrosten jäykkyysmoduulien jännitystilariippuvuuden.

APAS:issa (Lehtonen, 2009) on kuitenkin myös ongelmia, joista seuraavat pystytään ratkaisemaan mitoitusta tehtäessä:

1. Alkuperäisten materiaalien jännitystilariippuvuus on liian voimakas. Asfalttipäällysteen lisääminen lyhentää rakenteen kestoikää, koska kantavan kerroksen jännitystila laskee ja jännitystilariippuva jäykkyysmoduuli pienenee. Ratkaisuna asetetaan jännitystilariippuvuuden eksponentiksi 0 tai 0,25 alkuperäisen 0,5 sijaan.
2. Jännitystilariippuvan sitomattoman kantavan kerroksen lisääminen lyhentää kestoikää, koska jännitystilan laskentapiste siirtyy syvemmälle ja jännitystila pienenee.

Ratkaisuna jaetaan paksut sitomattomat kerrokset 50 mm lamelleihin, joille jännitystila lasketaan erikseen.

3. Sitomattomiin kerrokseen syntyy vetojännityksiä, joita ne eivät todellisuudessa kestä. Vetojännitykset näkyvät mitoitusraporteissa, mutta niitä ei oteta mitenkään huomioon. Ratkaisuna asetetaan ylemmän ja alemman kerroksen moduulien suhteeksi enintään 6, kuten Odemarkin menetelmässä. APAS rajoittaa automaattisesti ylemmän kerroksen jäykkyysmoduulia.
4. Laskenta aliarvioi sidotun kantavan kerroksen rakenteen kestoikää, koska niillä on väsymiskriteeri toisin kuin sitomattomilla kantavilla kerroksilla. Sidotuille kantaville kerroksille määritetään keinotekoiset väsymisfunktiot, joilla kestoikä vastaa parhaiten todellisuutta.

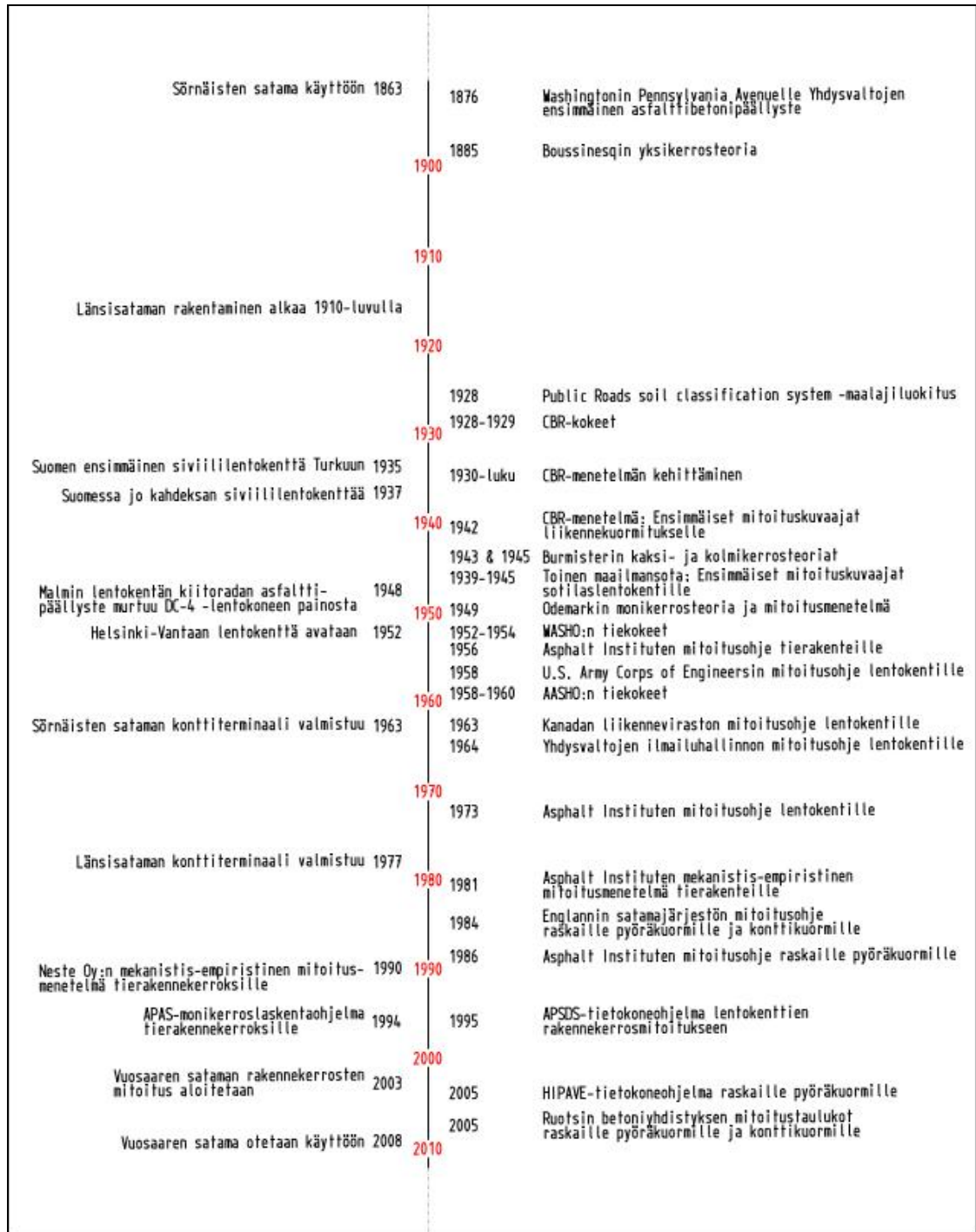
APAS:iin liittyy myös ongelmia, joita ei voida ottaa mitoituksessa täysin huomioon:

1. Ohuille asfalttipäällysteille lasketut jännitykset ja muodonmuutokset eivät vastaa todellista tilannetta, koska ohjelma siirtää todellisuudessa päällysteen alapintaan syntyvät vetojännitykset alempaan sitomattomaan kerrokseen. Sitomaton kerros ei ota vastaan vetoa, joten käytännössä vetojännitykset jätetään huomioimatta. Tästä syystä APAS liioittelee ohuen asfalttipäällysteen kestävyyttä, joten Liikenneviraston ohjeistuksen mukaan ohjelmaa ei käytetä alle 80 mm päällysteen mitoittamiseen.
2. Ohjelma liioittelee huonokuntoisemman alemman päällystekerroksen vaikutusta rakenteen kestoikään. Tämän takia APAS:ia ei käytetä parannuskohteiden mitoituksessa.
3. Asfalttibetonin väsymisfunktiot joudutaan määrittämään siten, että ne suosivat tietyn bitumilaadun käyttöä. Kokemusten perusteella suositaan yleisesti 50/70-bitumia.
4. Pohjamaan materiaaleilla on yhteiset väsymisfunktiot, jotka eivät kuvaa rakenteen todellista vaurioitumista ja urautumista. Liikenneviraston ohjeistuksen mukaan pohjamaan puristusmuodonmuutosta ei käytetä mitoituskriteerinä.

Rakenteen parantaminen liittyy myös useisiin uudiskohteisiin, joten tierakenteiden mitoituksessa on siirrytty lähes kokonaan Odemarkin kantavuusmitoituksen käyttöön. Puristusmuodonmuutokseen perustuvan mitoituskriteerin soveltumattomuuden takia kokonaisdeformaatio on otettava huomioon tierakenteen takuuajana tehtävillä uramittauksilla. APAS-laskentaan liittyy kuitenkin monia etuja verrattuna esimerkiksi Odemarkin menetelmään. Sen käyttö onkin suositeltavaa esimerkiksi Vuosaaren sataman tapaisissa rakennemitoituksen erikoistapauksissa, kun päällystepaksuudet ovat suuria ja mitoituksen tarkkuudella voidaan säästää huomattavasti rakennuskustannuksissa.

### 3. RAKENNEMITOITUKSEN KEHITYS RASKAILLE PYÖRÄKUORMILLE

Kuvassa 10 on esitetty mitoitusmenetelmien kehitys lähinnä Yhdysvalloissa ja Suomessa sekä Suomen lentokenttien ja pääkaupunkiseudun suursatamien kehitys.

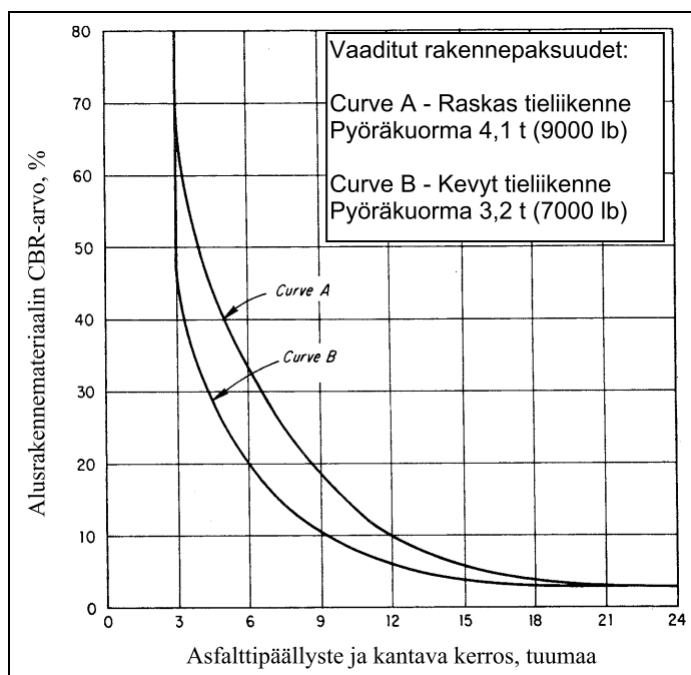


Kuva 10. Mitoitusmenetelmien sekä Suomen lentokenttien ja pääkaupunkiseudun suursatamien kehitys (Helsingin kaupunginmuseo, 6.4.2001. Helsingin Satama, 2005. Horonjeff & McKelvey, 1993. Huang, 2004. Järvinen, 1991a. Malmin lentokentän ystävät ry, 6.4.2001. Pienimäki, 2004. Silfwerbrand, 2005. Wardle ym., 2007. Yoder & Witczak, 1975).

### 3.1. Ensimmäiset mitoitusmenetelmät lentokentille

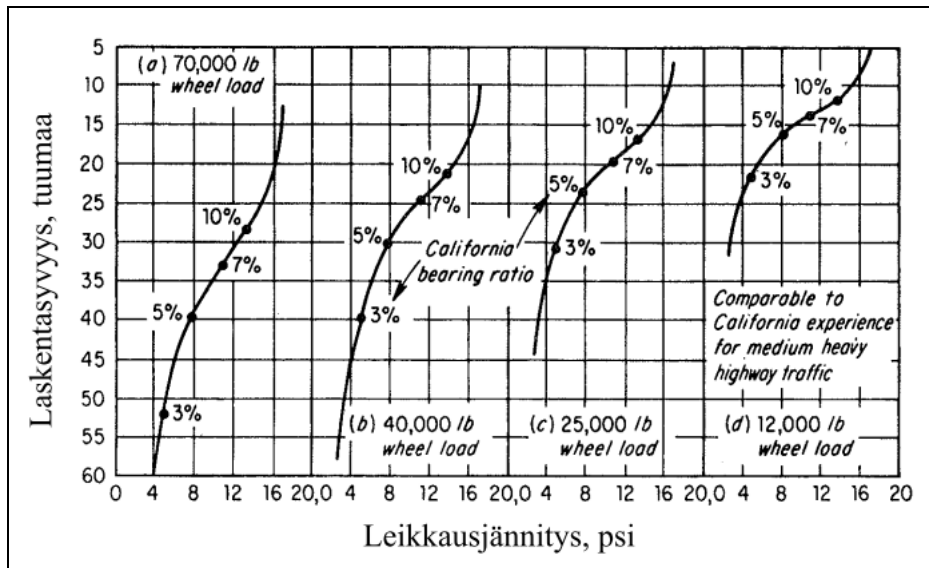
#### 3.1.1. CBR-menetelmä - U.S. Army Corps of Engineers

Horonjeffin ja McKelveyn (1993) mukaan Kalifornian liikenneviranomaiset suorittivat vuosina 1928 - 1942 CBR-kokeiden pohjalta tutkimuksia, joiden tuloksena syntyivät kuvassa 11 esitetyt päällystepaksuuden mitoituskuvaajat eri CBR-arvoilla kahdelle eri pyöräkuormalle. Toisen maailmansodan puhjettua Yhdysvaltojen armeijan piti löytää nopeasti käyttöön kelpaava menetelmä sotilaslentokenttien mitoitusta varten. U.S. Army Corps of Engineers päätti käydä läpi kaikki käytössä olevat tierakenteiden mitoitusmenetelmät ja valita niistä lentokenttien rakennemitoitukseen parhaiten sopivan. Lopulta CBR-menetelmä valittiin käyttöön ja aiemmasta käyttötarkoituksestaan huolimatta sitä pidetään ensimmäisenä erityisesti lentokenttiä ja muita raskaasti kuormitettuja alueita varten kehitettynä mitoitusmenetelmänä. U.S. Army Corps of Engineers luonnollisesti kehitti mitoitusmenetelmää omia tarpeitaan vastaavaksi, ja CBR-menetelmää kutsutaankin monissa teoksissa U.S. Army Corps of Engineersin menetelmäksi.



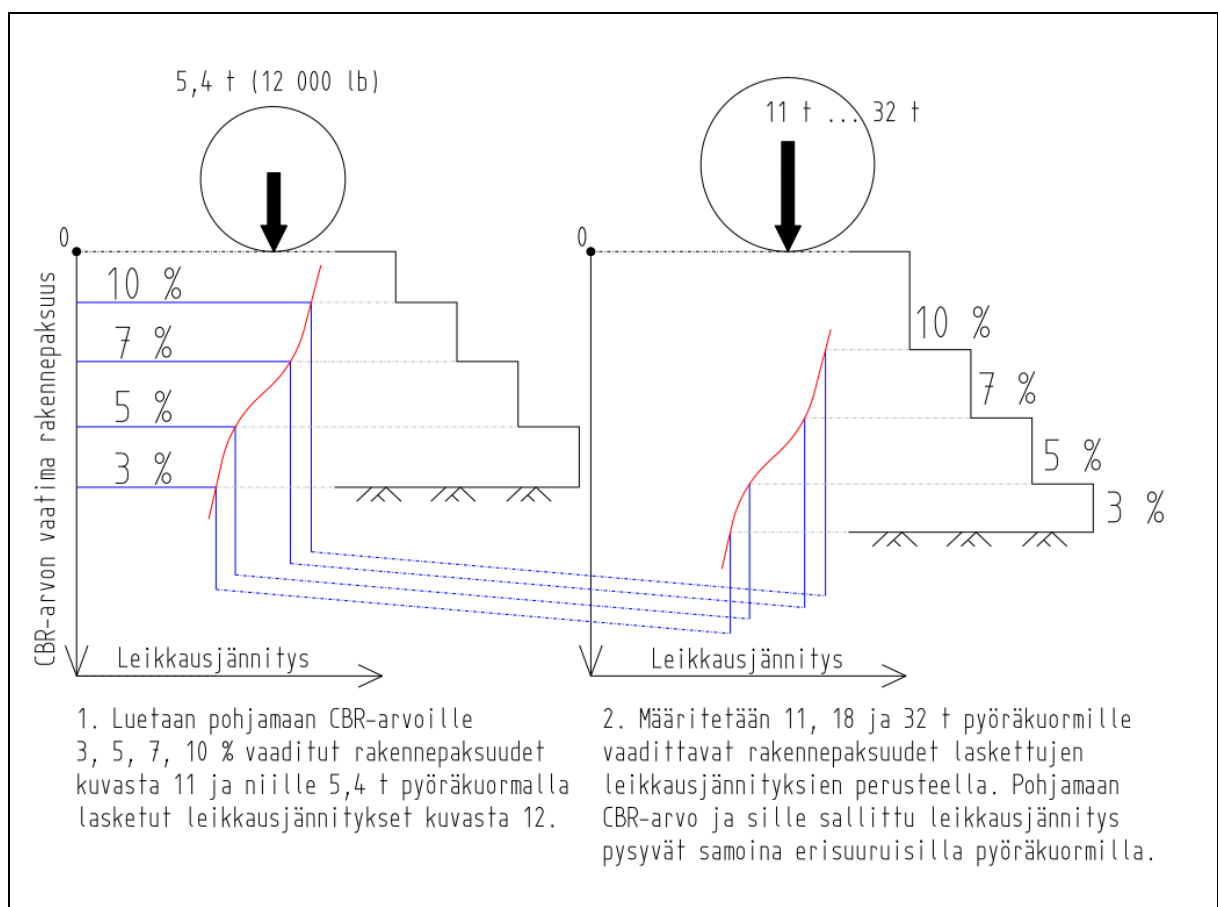
Kuva 11. CBR-tutkimuksissa määritetyt päällystepaksuuden kuvaajat (Muokattu lähteestä Horonjeff & McKelvey, 1993).

Yoderin ja Witczakin (1975) mukaan U.S. Army Corps of Engineers arvioi kuorma-auton 4,1 t (9000 lb) pyöräkuorman vastaavan lentokoneen noin 5,4 t (12 000 lb) pyöräkuormaa. Perusteluina oletukselle olivat tieliikenteen voimakkaampi kanavoituminen ja lentokentillä sallitut suuremmat muodonmuutokset. Lentokoneiden pyöräkuormat olivat tuohon aikaan välillä 11 - 32 t (25 000 - 70 000 lb), joten mitoituskuvaajat suuremmille kuormille olivat tarpeen. U.S. Army Corps of Engineers laski kuvassa 12 esitetyt pohjamaan leikkausjännitykset eri syvyyksillä alkuperäisen 5,4 t pyöräkuorman lisäksi 11, 18 ja 32 t (25 000, 40 000 ja 70 000 lb) pyöräkuormille.



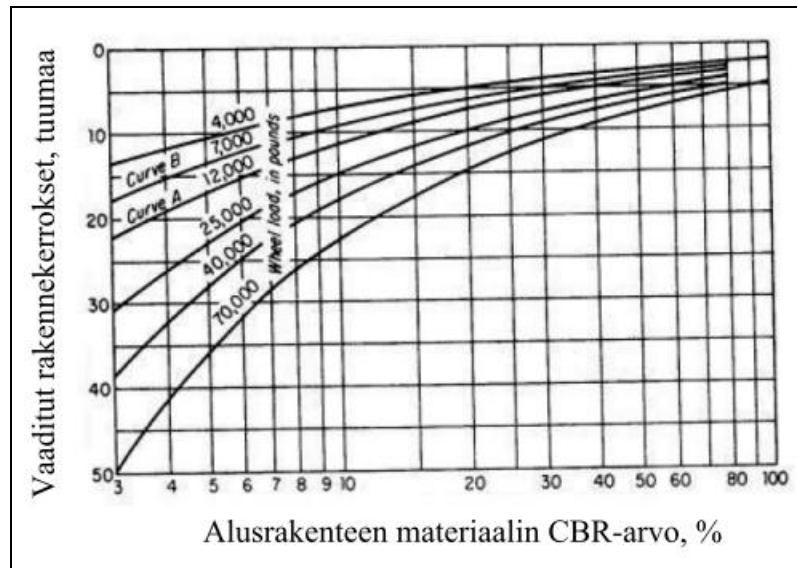
Kuva 12. Lasketut leikkausjännitykset eri syvyyksillä neljälle eri pyöräkuormalle (Muokattu lähteestä Horonjeff & McKelvey, 1993).

Laskennallisten leikkausjännitysten perusteella voitiin määrittää mitoituskuvaajat myös kolmelle raskaammalle pyöräkuormalle kuvassa 13 esitetyllä tavalla. Kuvassa 14 esitetyt kuvaajat ovat ensimmäiset raskaille pyöräkuormille muodostetut mitoituskuvaajat.



Kuva 13. Mitoituskuvaajien määrittystapa 11, 18 ja 32 t pyöräkuormille.





Kuva 14. Ensimmäiset mitoituskuvaajat raskaille pyöräkuormille (Muokattu lähteestä Horonjeff & McKelvey, 1993).

Yoderin ja Witczakin (1975) mukaan U.S. Army Corps of Engineers kehitti jatkossa menetelmää erityisesti lentokenttien rakennemitoitusta varten ja myöhemmin menetelmä oli perustana myös useille siviililentokenttien mitoitusmenetelmille. Pohjamaan materiaaliominaisuuksien tutkimuksia jatkettiin laboratoriossa ja tehtiin myös mitoituskuvaajia erilaisilla pakkasmäärillä ja routasyvyyksillä. U.S. Army Corps of Engineers oli myös ensimmäisten joukossa tutkimassa redusoidun pyöräkuorman määrittystapoja erilaisilla pyöräkuormilla, rengaspaineilla ja lentokoneiden laskutelinemalleilla. Redusoituun pyöräkuormaan liittyvää tutkimusta on käsitelty tarkemmin kappaleessa 3.2. Kun mitoituksen perusasiat olivat kunnossa, alettiin kiinnittää yhä enemmän huomiota rakenteelta vaadittuihin ominaisuuksiin lentokenttien eri osa-alueilla, kuten kiitoradoilla sekä laskeutumis-, nousu- ja odotusalueilla.

Vuonna 1958 U.S. Army Corps of Engineers julkaisi kokonaisvaltaisen mitoitusohjeen, jossa oli mitoituskuvaajat erisuuruisille pyöräkuormille, rengaspaineille, laskutelinemalleille ja liikennealueille. CBR-menetelmän jälkeen syntyi myös muita lentokentille tarkoitettuja mitoitusmenetelmiä, joissa hyödynnettiin myös CBR-menetelmän tutkimusaineistoa. Tällaisia olivat esimerkiksi vuosina 1963 ja 1964 julkaistut Kanadan liikenneviraston ja Yhdysvaltojen ilmailuhallinnon menetelmät sekä vuonna 1973 julkaistu Asphalt Instituten menetelmä. Samaan aikaan kehitettiin myös paikalla valettujen betonipäällysteiden mitoitusmenetelmiä lentokentille, mutta niitä ei ole tässä tutkimuksessa käsitelty.

### 3.1.2. Asphalt Instituten menetelmä

CBR-menetelmän lisäksi eniten tässä tutkimuksessa käsiteltäviin menetelmiin ja perinteisiin tierakenteiden mitoitusmenetelmiin vaikuttaneista lentokenttien mitoitusmenetelmistä oli Asphalt Instituten menetelmä. Se kehitettiin yhdessä vuonna 1956 julkaistun ensimmäisen Asphalt Instituten päällystemitoitusohjeen ja sen myöhempien painosten kanssa. Mitoitusmenetelmän kehitystyötä varten tutkittiin osa-alueita, jotka ovat nykyäänkin rakennemitoituksen pohjana. Nämä osa-alueet olivat

- asfalttipäällysteen lämpötila
- asfalttipäällysteen ja pohjamaan materiaaliominaisuudet
- mitoituskriteerit asfalttipäällysteen ja pohjamaan muodonmuutoksille
- ekvivalenttiakselikuormitus.

Yoderin ja Witczakin (1975) mukaan Asphalt Institute kehitti mitoitusohjetta varten laskentakaavan ja kuvaajat asfalttipäällysteen lämpötilan määrittämiseksi kuukausien keskilämpötilojen perusteella. Tällä tavalla mitoituksessa pystyttiin hallitsemaan vuodenaajoista johtuvat vaatimukset, kuten deformaatiokestävyys korkeissa lämpötiloissa ja väsymiskestävyys matalissa lämpötiloissa. Lisäksi tutkimuksessa kehitettiin laskentakaava, jolla asfalttipäällysteen jäykkyysmoduuli pystyttiin määrittämään eri lämpötiloissa. Mitoituskriteerit olivat nykyäänkin käytössä olevat vetomuodonmuutos sidotun kerroksen alapinnassa ja puristusmuodonmuutos pohjamaan yläpinnassa. Mitoituskriteeri asfalttipäällysteen väsymiselle saatiin vuosina 1958 - 1960 tehtyjen AASHO:n tiekokeiden jatkoanalyysin tuloksena. Pohjamaan mitoituskriteeri saatiin analysoimalla CBR-menetelmällä mitoitettuja päällysterakenteita monikerroslaskennalla. Asphalt Institute kehitti lämpötilamallin ja mitoituskriteerien pohjalta päällystepaksuuden mitoitusuorat, joissa muuttujina olivat pohjamaan jäykkyysmoduuli, vuoden keskilämpötila ja liikennemäärä.

Asphalt Institute otti ilmeisesti ensimmäisenä maailmassa käyttöön ekvivalenttiakselikuormituksen mitoituskäsitteenä. Tätä varten Asphalt Institute kehitti vastaavuuskertoimet eri lentokonemalleille. Myöhemmin vastaavuuskertoimia on käytetty lähinnä tierakenteiden mitoituksessa, kun lentokentillä ja muilla raskaasti kuormitetuilla kentillä on siirrytty käyttämään ekvivalenttipyöräkuormitusta. Standardikuormana oli silloinen DC-8-63F -lentokone, jonka aiheuttamia jännityksiä ja muodonmuutoksia päällysteessä sekä pohjamaassa vertailtiin muiden lentokoneiden vastaaviin. Lentokoneiden kehitys ja erityisesti niiden massan kasvu vaativat ohjeiden nopeaa päivitystä ja ekvivalenttipyöräkuormituksen eli redusoidun pyöräkuorman teorian kehittämistä. Vuonna 1987 ilmestyi jo kolmas painos mitoitusohjeesta, joka on myös viimeisin.

### 3.2. Redusoitu pyöräkuorma ja sen laskentaperiaatteet

Tämän tutkimuksen teoriaosuus redusoidusta pyöräkuormasta perustuu kirjan ”Principles of Pavement Design” toiseen painokseen (Yoder & Witczak, 1975) sekä vahvasti teorian kehittämiseksi mukana olleen Huangin kirjan ”Pavement Analysis and Design” toiseen painokseen (2004). Redusoidun pyöräkuorman teoriaa alettiin siis kehittää toisen maailmansodan aikana, jolloin uudelleenlaiselle kuormitustyyppille ei ollut taloudellisista ja aikataulullisista syistä mahdollisuutta kehittää täysin uutta mitoituskriteeriä.

Redusoidun pyöräkuorman määrittäminen tapahtui analyyttisesti, mutta AASHO:n ja WASHO:n suorittamat tiekoeket olivat keskeisessä osassa laskentatulosten varmentamisessa. Uudessa menetelmässä pari- tai monipyörä muutettiin saman pystysuuntaisen jännityksen tai kokoonpuristuman aikaansaavaksi ekvivalenttipyöräksi. Laskentakaavoissa esiintyvä kuormituspinnan säde määritettiin joko pyöräkuorman ja rengaspaineen tai suoraan kuormituspinta-alan perusteella kaavoilla

$$a = \sqrt{\frac{P}{\pi p}} \quad (3.1)$$

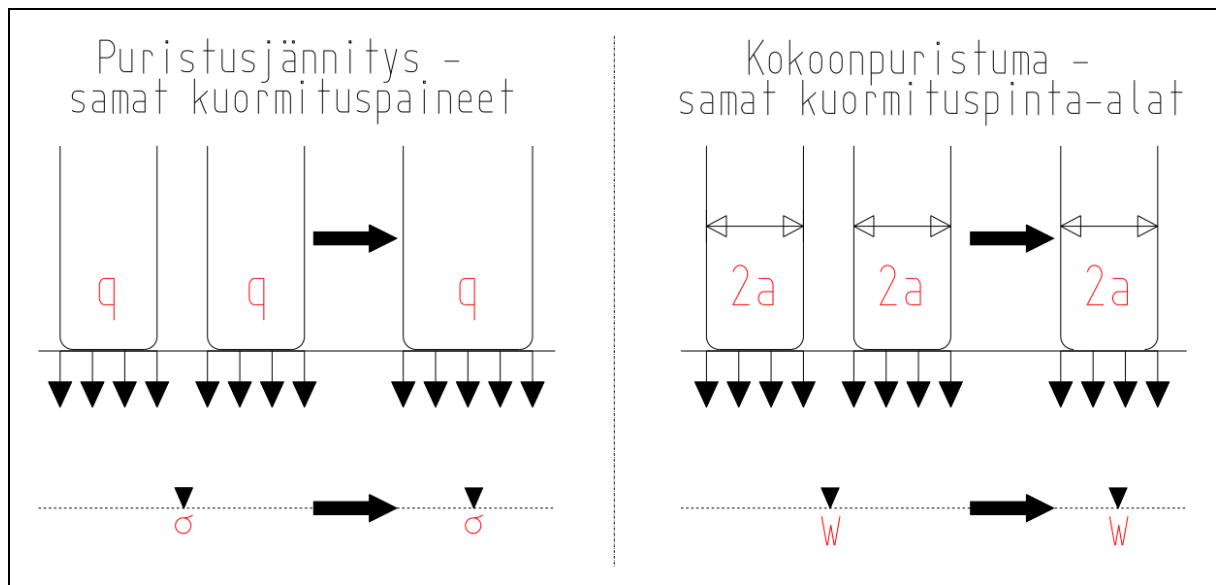
$$a = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (3.2)$$

joissa

|   |  |
|---|--|
| a | on kuormituspinnan säde (mm)                 |
| A | kuormituspinnan pinta-ala (mm <sup>2</sup> ) |
| P | pyöräkuorma (N)                              |
| p | rengaspaine (N/mm <sup>2</sup> ).            |

Menetelmiä kehitettäessä huomattiin, että laskennoissa käytetyllä kriteerillä oli suuri vaikutus määritetyn redusoidun pyöräkuorman suuruuteen. Jännitysten ja muodonmuutosten laskenta perustui aluksi Boussinesqin yksikerrosteoriaan ja myöhemmin Burmisterin kaksikerrosteoriaan. Redusoidun pyöräkuorman määrittämisessä käytettyjä kriteerejä olivat kuvassa 15 esitetyt

- puristusjännitys pohjamaan pinnalla - yhtä suuri kuormituspaine
- pystysuuntainen kokoonpuristuma valitulla syvyydellä - yhtä suuri kuormituspinta-ala.



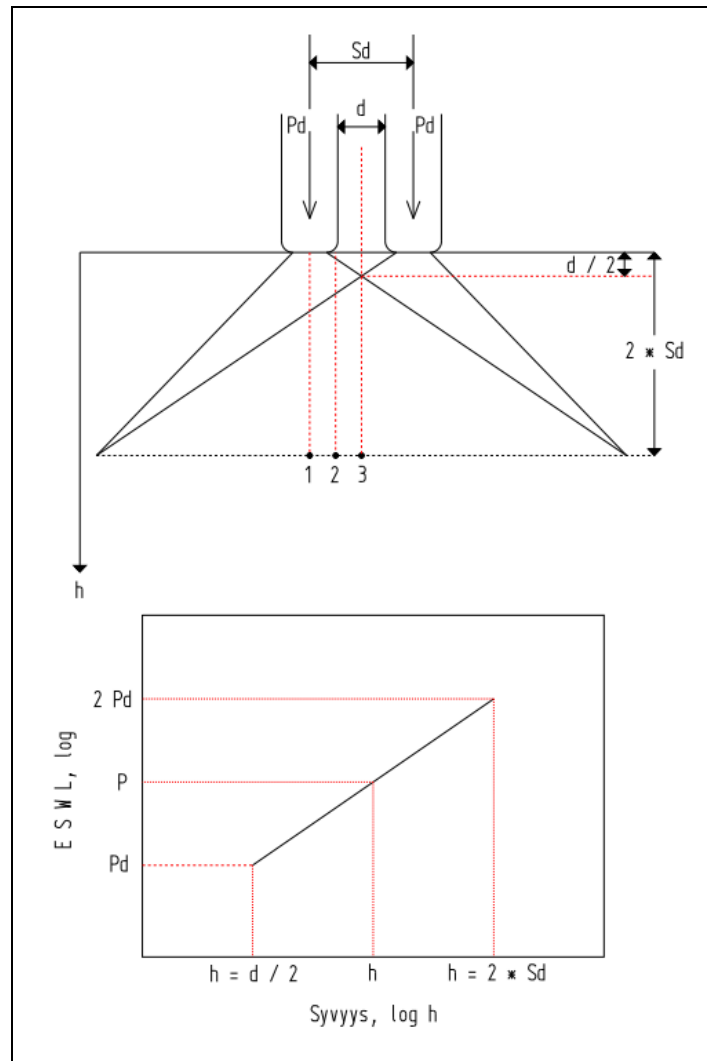
Kuva 15. Redusoidun pyöräkuorman määrityskriteerit.

### 3.2.1. Boussinesqin yksikerrosteoria

CBR-menetelmää kehittänyt U.S. Army Corps of Engineers oli myös redusoidun pyöräkuorman teorian edelläkävijöitä. Ensimmäisessä versiossa U.S. Army Corps of Engineers käytti mitoituskriteerinä puristusjännitystä pohjamaan pinnalla. Jännitykset laskettiin kolmesta kohdasta ja suurinta pidettiin maksimijännityksenä. Laskentakohdat olivat

- toisen pyörän keskikohdan alapuolella (piste 1 kuvassa 16)
- kahden pyörän puolivälissä (piste 3 kuvassa 16)
- kahden ensimmäisen pisteen puolivälissä (piste 2 kuvassa 16).

Redusoitu pyöräkuorma määräytyi pyöräkuormien, päällystepaksuuden, renkaiden lähimmän etäisyyden ja niiden keskeltä-keskelle -välin perusteella. Redusoitu pyöräkuorma ja päällystepaksuus jouduttiin siten määrittämään iteratiivisesti, koska ne olivat riippuvaisia toisistaan. Kun päällystepaksuus oli pienempi kuin puolet renkaiden lyhyimmästä etäisyydestä, redusoitu pyöräkuorma oli yhtä suuri kuin yhden renkaan kuorma. Tämä voidaan havaita kuvasta 16, jossa syvyydellä  $h < 0,5d$  ei synny päällekkäisiä jännityksiä. Kun päällystepaksuus oli suurempi kuin kaksi kertaa renkaiden keskeltä-keskelle -väli, jännitykset limittyivät kokonaan ja redusoitu pyöräkuorma oli molempien renkaiden yhdistetyn kuorman suuruinen. Redusoidun pyöräkuorman määrittäminen onnistui logaritmiseen asteikkoon piirretyltä suoralta (kuvassa 16) tai kaavan 3.3 avulla. Muita pohjamaan puristusjännitykseen perustuvia määrittäytöksiä olivat Kanadan liikenneviraston, Yhdysvaltojen ilmailuhallinnon sekä Yhdysvaltojen laivaston menetelmät.



Kuva 16. Redusoidun pyöräkuorman määrittäminen ensimmäisessä U.S. Army Corps of Engineersin menetelmässä.

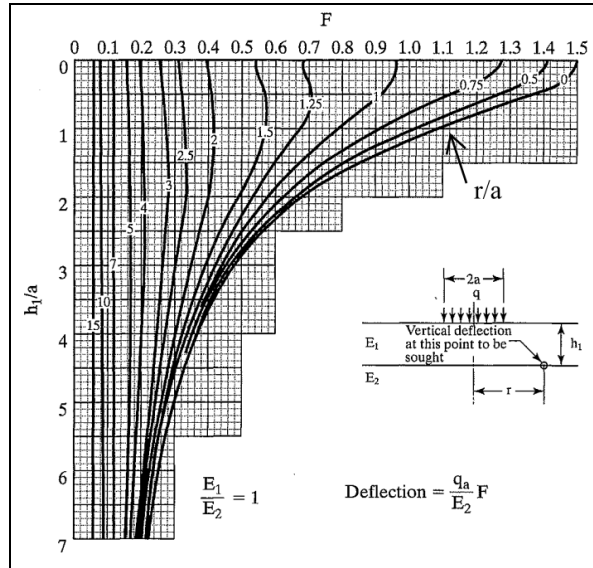
Redusoidun pyöräkuorman määrittämiseen kehitetty laskentakaava U.S. Army Corps of Engineersin menetelmässä:

$$\log(\text{ESWL}) = \log P_d + \frac{0,301 \times \log\left(\frac{2 \times h}{d}\right)}{\log\left(\frac{4 \times S_d}{d}\right)} \quad (3.3)$$

jossa

|       |  |
|-------|--|
| ESWL  | on redusoitu pyöräkuorma (kN)                        |
| $P_d$ | monipyörän yhden renkaan pyöräkuorma (kN)            |
| $h$   | päällystepaksuus (mm)                                |
| $d$   | monipyörän renkaiden lyhyin etäisyys toisistaan (mm) |
| $S_d$ | renkaiden keskeltä-keskelle -väli (mm).              |

Tiekokeista saatujen kokemusten perusteella pohjamaan puristusjännitykseen perustuvaa redusoidun pyöräkuorman määrittystapaa ei kuitenkaan pidetty riittävänä. U.S. Army Corps of Engineers valitsi uudeksi mitoituskriteeriksi pohjamaan pinnan pystysuuntaisen kokoonpuristuman. Redusoidun pyöräkuorman laskemiseen käytettiin erikseen monipyörälle ja yksikköpyörälle määritettäviä taipumakertoimia, jotka määräytyivät renkaan kuormitussäteen, päällystesyvyyden ja laskentapisteen etäisyyden perusteella. Taipumakertoimet Boussinesqin yksikerrosteorian mukaisella moduulijakaumalla  $E_1/E_2 = 1$  on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Boussinesqin yksikerrosteorian mukaiset taipumakertoimet (Muokattu lähteestä Huang, 2004).

Monipyörän taipumakerroin määritetään samalta kuvaajalta superpositioperiaatteella. Tämän jälkeen kokoonpuristumat monipyörälle ja yksikköpyörälle voidaan laskea kaavoilla

$$w_s = \frac{q_s \times a}{E} \times F_s \quad (3.4)$$

$$w_d = \frac{q_d \times a}{E} \times F_d \quad (3.5)$$

joissa

|       |   |
|-------|---|
| $w_s$ | on kokoonpuristuma yksikköpyörälle (mm)             |
| $w_d$ | kokoonpuristuma monipyörälle (mm)                   |
| $q_s$ | yksikköpyörän kuormitusjännitys ( $\text{N/mm}^2$ ) |
| $q_d$ | monipyörän kuormitusjännitys ( $\text{N/mm}^2$ )    |
| $F_s$ | taipumakerroin yksikköpyörälle (-)                  |
| $F_d$ | taipumakerroin monipyörälle (-)                     |
| $a$   | kuormitussäde (mm)                                  |
| $E$   | pohjamaan jäykkyysmoduuli (MPa).                    |

Redusoidun pyöräkuorman tapauksessa molemmat kokoonpuristumat  $w_d$  ja  $w_s$  ovat yhtä suuria. Kuormitusjännitys on lisäksi suoraan verrannollinen pyöräkuormaan, koska kuormituspinta-alat ovat samat. Siten kaavat 3.4 ja 3.5 yhdistämällä voidaan johtaa redusoidulle pyöräkuormalle kaava

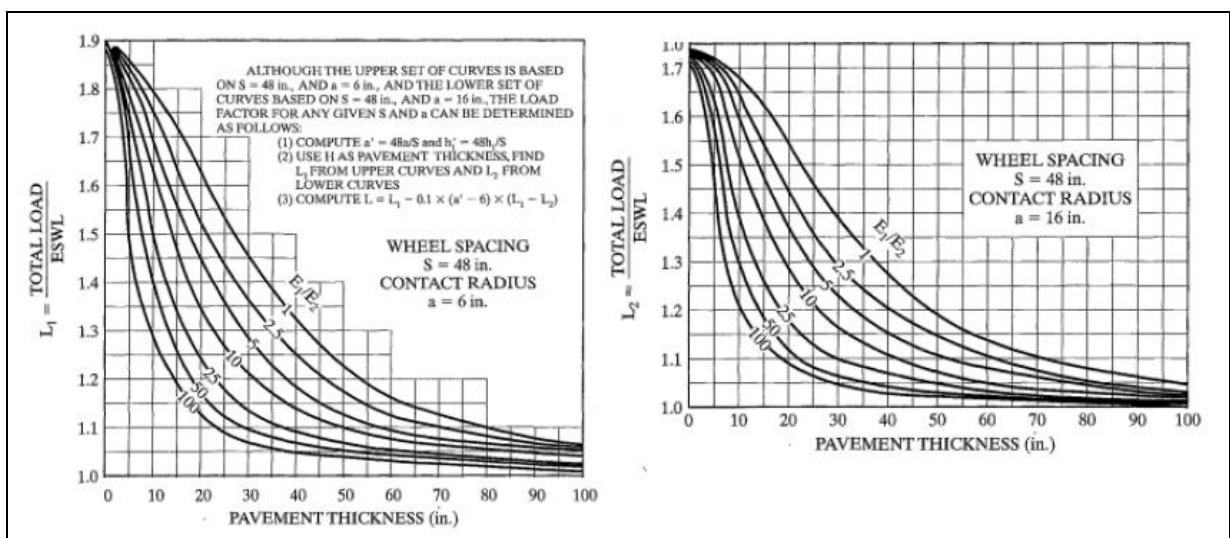
$$ESWL = P_s = \frac{F_d}{F_s} \times P_{tot} \quad (3.6)$$

jossa

|           |   |
|-----------|---|
| $P_{tot}$ | on monipyörän kokonaiskuorma (kN)                       |
| $ESWL$    | yksikköpyörää $P_s$ vastaava redusoitu pyöräkuorma (kN) |
| $F_s$     | taipumakerroin yksikköpyörälle (-)                      |
| $F_d$     | taipumakerroin monipyörälle (-).                        |

### 3.2.2. Burmisterin kaksikerrosteoria

Huang ei pitänyt yksikerrosteoriaan perustuvaa redusoidun pyöräkuorman laskentatapaa riittävänä ja kehitti itse Burmisterin kaksikerrosteoriaan perustuvan laskentatavan. Mitoituskriteerinä oli myös pohjamaan pinnan pystysuuntainen kokoonpuristuma. Huang kehitti kuvassa 18 esitetyt kuvaajat kokonaiskuorman ja redusoidun pyöräkuorman suhteelle. Kuvaajista voidaan määrittää kuormituskerroin  $L$  suoraan kahdella eri kuormitussäteellä. Huang kehitti myöhemmin Asphalt Institutin mitoitusmenetelmään kuvaajan, josta kuormituskerroin voidaan määrittää useilla rengasvälin ja kuormitussäteen suhteilla. Kuvaajaa käytetään Asphalt Institutin raskaille pyöräkuormille tarkoitetussa mitoitusmenetelmässä paripyörän ekvivalenttikuorman määrittämiseen. Menetelmää käsitellään myöhemmin kappaleessa 4.1.3.



Kuva 18. Kuvaaja kuormituskertoimille eri kuormitussäteillä (Huang, 2004).

Kuormituskerroin  $L$  on kokonaiskuorman ja redusoidun pyöräkuorman suhde eli paripyörälle laskettuna

$$L = \frac{2 \times P_d}{P_s} \quad (3.7)$$

jossa

$L$  on kuormituskerroin  
 $P_d$  paripyörän yhden renkaan pyöräkuorma (kN)  
 $P_s$  yksikköpyörän pyöräkuorma eli redusoitu pyöräkuorma (kN).

Määrittämällä kuormituskerroin  $L$  kuvaajalta redusoitu pyöräkuorma voidaan siten laskea kaavalla

$$ESWL = P_s = \frac{2 \times P_d}{L} \quad (3.8)$$

Kuormituskertoimen määrittämiseksi eri kuormitussäteillä  $a$  ja renkaiden keskeltä-keskelle -väleillä  $S_d$  määritetään muutettu kuormitussäde  $a'$  ja muutettu päällystepaksuus  $h_1'$  kaavoilla

$$a' = \frac{48 \times a}{S_d} \quad (3.9)$$

$$h_1' = \frac{48 \times h_1}{S_d} \quad (3.10)$$

joissa

$a$  on määritettävän pyöräkuorman kuormitussäde (tuumaa)  
 $a'$  48 tuuman rengasväliä vastaava kuormitussäde (tuumaa)  
 $h_1$  päällystepaksuus (tuumaa)  
 $h_1'$  muutettu päällystepaksuus 48 tuuman rengasvälille (tuumaa).  
 $S_d$  mitoittavan rengaskuorman keskeltä-keskelle -väli (tuumaa).

Muutetulla päällystepaksuudella  $h_1'$  määritetään kuvasta 18 kertoimet  $L_1$  ja  $L_2$ , joiden avulla lasketaan kuormituskerroin kaavalla

$$L = L_1 - (L_1 - L_2) \times \frac{a' - 6}{10} \quad (3.11)$$

Tämän jälkeen redusoitu pyöräkuorma voidaan laskea normaalisti kaavalla 3.8. Huang kehitti aiemmin kuvassa 17 esitetyt taipumakertoimien määrittämisdiagrammit myös kaksikerrosteorian



mukaisille rakennekerroksille eri moduulijakaumilla  $E_1/E_2$ . Huang yhdisti nämä diagrammit redusoidun pyöräkuorman määrittämiseksi monipyörälle Asphalt Instituten raskaille pyöräkuormille tarkoitettussa mitoitusmenetelmässä. Diagrammi ja mitoitusmenetelmä esitellään kappaleessa 4.1.4.

## **4. MITOITUSMENETELMÄT RASKAILLE PYÖRÄKUORMILLE JA KONTTIKUORMILLE**

Kappaleessa esitellään yhdysvaltalaisen Asphalt Instituten, englantilaisen Interpaven ja Ruotsin betoniyhdistyksen eli CBI:n mitoitusohjeet sekä australialainen HIPAVE-tietokoneohjelma. Ohjelmasta oli käytettävissä kokeiluversio, jossa kokonaisrakennepaksuus oli rajoitettu yhteen metriin. Lisäksi kappaleessa esitellään, miten Vuosaaren sataman rakennekerrosten mitoituksessa sovellettiin nykyisiä Suomessa käytettyjä tierakenteiden mitoitusmenetelmiä.

### **4.1. Asphalt Institute - Yhdysvallat**

Tässä kappaleessa käsitellään Asphalt Instituten uusinta raskaille pyöräkuormille tarkoitettua mitoitusohjetta (Asphalt Institute, 2006). Ohjeessa ei käsitellä staattisten konttikuormien määrittämistä eikä päällysteen mitoitusta konttikuormille. Mitoitusohje perustuu pitkälti Asphalt Institutin kahteen aiempaan mitoitusmenetelmään tierakenteille (Asphalt Institute, 1999) ja lentokentille (Asphalt Institute, 1987). Mitoitusmenetelmän yksinkertaistamiseksi mitoituskriteerinä käytetään kuitenkin vain pohjamaan pinnan kokoonpuristumaa. Asphalt Institutin muiden ohjeiden tapaan mitoitusohje on tarkoitettu syväasfalttirakenteille, joille ei käytetä paksuja sitomattomia rakennekerroksia. Mitoitusohjeen suosittelema asfalttipäällysteen vähimmäispaksuus ohjeessa käsitellyille pyöräkuormille on 180 mm.

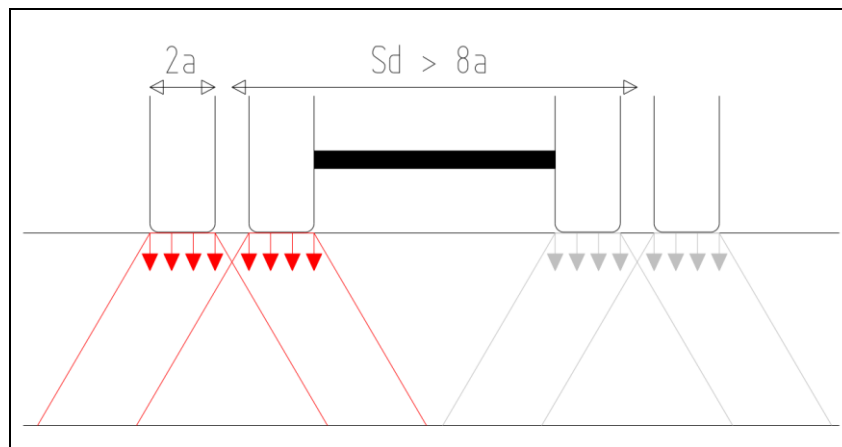
#### **4.1.1. Mitoituskuormat**

Mitoitusmenetelmässä renkaan kuormituspinta oletetaan ympyrän muotoiseksi, ja sen säde lasketaan kappaleessa 3.2 esitetyllä tavalla joko pyöräkuorman ja rengaspaineen tai suoraan kuormituspinnan pinta-alan perusteella. Kuormituspainne riippuu ajoneuvon omasta massasta, kuorman massasta sekä renkaiden kuormituspinnan suuruudesta. Ohjeeseen sisältyvät esimerkit erilaisten työkonien kosketuspaineiden laskentaan. Kosketuspaineiden laskenta etenee yleisesti seuraavasti:

1. Määritetään kokonaiskuorma ajoneuvon oman massan ja kuorman perusteella.
2. Jaetaan kokonaiskuorma akseleille ajoneuvon valmistajalta saatavan jakauman perusteella.
3. Jaetaan akselikuorma tasan jokaiselle akselin pyörälle.
4. Lasketaan renkaiden kosketuspaine pyöräkuorman ja rengasvalmistajalta saatavan kuormituspinta-alan perusteella.

Kokonaiskuorman määrittämisessä täytyy ottaa huomioon, että täyden kuorman käyttö mitoituskuormana johtaa helposti ylimitoitukseen. Asphalt Instituten mukaan tutkimukset eräässä konttiterminaalissa ovat osoittaneet, että konttikuormaimet operoivat noin puolet ajasta tyhjinä ja kuljetettavista konteista vain 5 % on täysiä. Toisessa tutkimuksessa on päätelty, että 60 % mitoituskuorman käyttäminen johtaa riittävään mitoituskuormaan 88 % ajasta. Toisaalta liitteessä N.1 esitettyä mitoituskuormaa tehtäessä havaittiin, että mitoitusohjeen laskentaesimerkissä vastapainotrukin mitoituskuorma lasketaan niin sanotun kaatumiskuorman (tipping load) perusteella. Kaatumiskuorma lasketaan trukin maksiminostokapasiteetin perusteella, joka on selvästi suurempi kuin yhden kontin suurin sallittu kuorma.

Mitoitus tehdään mitoitusdiagrammien avulla joko yksikkörenkaalle, paripyörälle tai monipyörälle. Renkaat käsitellään yksikköpyöränä, jos niiden keskeltä-keskelle -väli on suurempi kuin kahdeksan kertaa renkaan kuormituspinnan säde. Kuvassa 19 on esitetty kahtena paripyöränä käsiteltävä neljän pyörän akseli. Paripyörän ja monipyörän tapauksessa määritetään pohjamaan pinnan pystysuuntainen kokoonpuristuma useamman pyörän kuormituksella. Tämän jälkeen määritetään saman kokoonpuristuman aikaansaava redusoitu pyöräkuorma, jota käytetään mitoittavana kuormana. Redusoidun pyöräkuorman määrittäminen on kehitetty versio Huangin menetelmästä, jota on käsitelty tämän tutkimuksen kappaleessa 3.2.2.

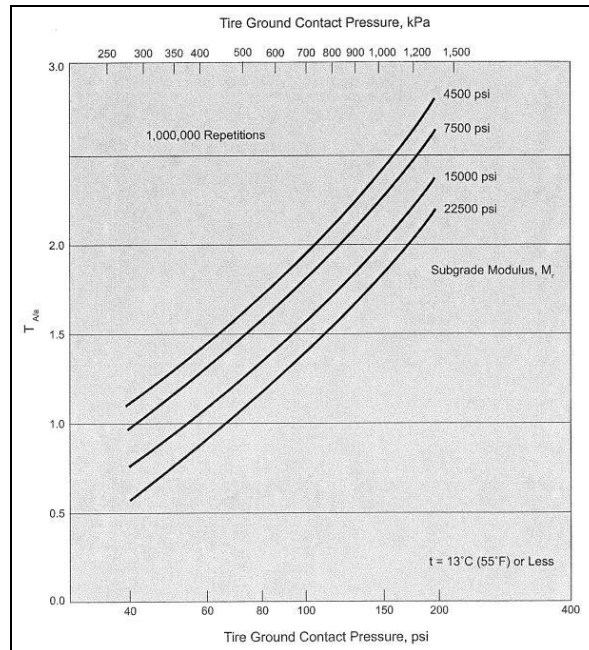


Kuva 19. Asphalt Instituten määrittäminen yhdistettävälle ja erikseen käsiteltävälle renkaalle.

#### 4.1.2. Mitoitus yksikköpyörälle

Päällystepaksuuden mitoitus yksikköpyörälle perustuu Asphalt Instituten mitoituskuvaajiin, joita on yhteensä kuusi kolmelle kuormituskertamäärälle kahdella vuosittaisella lämpötilakeskiarvolla. Kuormituskertojen määrät ovat 10 000, 100 000 ja 1 000 000. Määrittäminen kylmemmälle ympäristölle on, että kolmen kuukauden päiväkohtainen keskilämpötila on  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  tai alle ja koko vuoden päiväkohtainen keskilämpötila on alle  $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Lämpimämmälle ympäristölle päiväkohtainen keskilämpötila on koko vuoden yli  $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kuvassa 20 on esitetty mitoituskuvaaja miljoonalle kuormituskerralle kylmemmässä ympäristössä.

Mitoituskuvaajasta luetaan  $T_{A/a}$ -arvo pohjamaan jäykkyysmoduulin ja renkaan kosketuspaineen perusteella.



Kuva 20. Asphalt Instituten mitoituskuvaaja yksikköpyöräkuormitukselle (Asphalt Institute, 2006).

Lopullinen päällystepaksuus saadaan kaavasta

$$T_A = T_{A/a} \times a \quad (4.1)$$

jossa

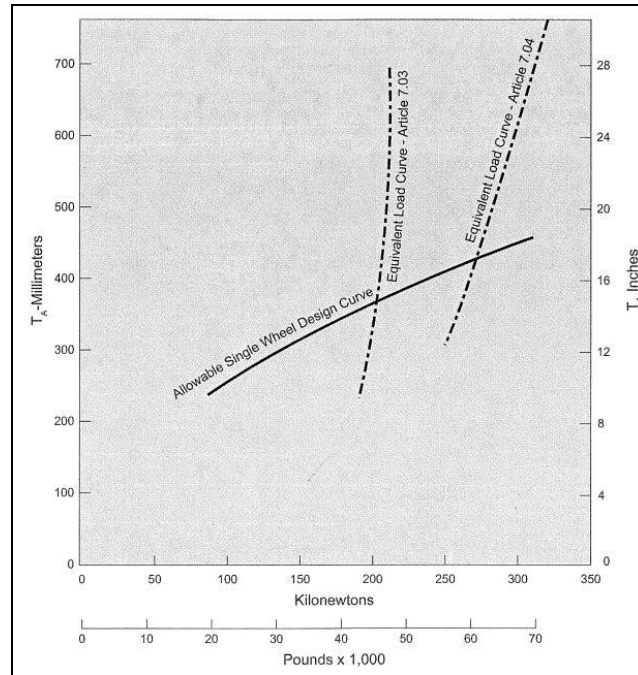
$T_A$  on päällystepaksuus (mm)

$T_{A/a}$  pohjamaan jäykkyysmoduulin ja renkaan kosketuspaineen perusteella määritettävä kerroin kuvasta 20 (-)

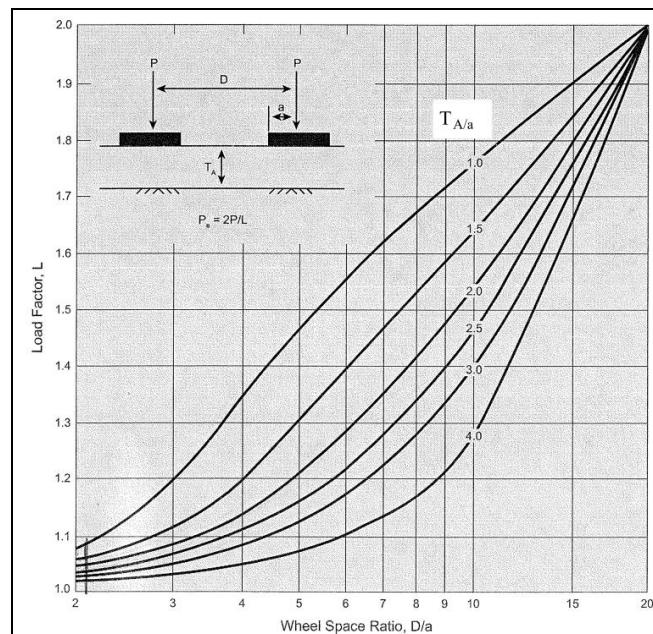
$a$  renkaan kuormituspinnan säde (mm).

#### 4.1.3. Mitoitus paripyörälle

Paripyöräkuormituksen päällystemitoitusta varten muodostetaan ensin kuvassa 21 esitetty sallitun yksikköpyöräkuorman kuvaaja (allowable single wheel design curve), jossa päällystepaksuus on kuvattu pyöräkuorman funktiona. Pyöräkuorman minimiarvona käytetään suurinta yksittäistä pyöräkuormaa ja maksimiarvona 60 % koko kuormasta. Päällystepaksuus eri pyöräkuormilla ja kosketuspaineilla määritetään kappaleen 4.1.2 mukaisesti.



Kuva 21. Asphalt Instituten mitoituskuvaaja paripyöräkuormitukselle (Asphalt Institute, 2006).



Kuva 22. Kuvaaja kuormituskertoimen L määrittämiseksi (Asphalt Institute, 2006).

Redusoidun pyöräkuorman kuvaajan (equivalent load curve) määrittämiseksi kuormituskertoimet  $L$  luetaan kuvan 22 diagrammista, joka on kehitetty versio kappaleessa 3.2.2 mainituista Huangin alkuperäisistä diagrammeista. Uudesta diagrammista kuormituskertoimet voidaan määrittää suoraan eri rengasvälin ja kuormitussäteen suhteilla sekä arvioiduilla päällystepaksuuden ja kuormitussäteen suhteilla. Redusoidun pyöräkuorman kuvaaja määritetään laskemalla redusoidut pyöräkuormat eri kuormituskertoimen  $L$  arvoilla kaavalla

$$ESWL = \frac{2 \times P_d}{L} \quad (4.2)$$

jossa

ESWL on redusoitu pyöräkuorma (kN)  
 $P_d$  monipyörän yhden renkaan pyöräkuorma (kN)  
 $L$  kuormituskerroin kuvasta 22 (-).

Kaava vastaa kappaleessa 3.3.2 esitettyä Huangin laskukaavaa 3.8. Redusoidun pyöräkuorman kuvaaja piirretään samaan koordinaatistoon sallitun yksikköpyörän kuvaajan kanssa, ja vaadittava päällystepaksuus saadaan suorien leikkauskohdasta. Kuvassa 21 esitetty toinen redusoidun pyöräkuorman kuvaaja (article 7.04) vastaa tilannetta, jossa kaksi paripyörää joudutaan yhdistämään yhdeksi ekvivalenttipyöräksi. Näin joudutaan tekemään, jos paripyörien keskeltä-keskelle -väli on pienempi kuin kahdeksan kertaa kuormituspinnan säde. Laskenta on suoritettu muuten samalla tavalla, mutta yhden renkaan pyöräkuorma on edellisessä kohdassa määritetty redusoitu pyöräkuorma.

#### 4.1.4. Mitoitus monipyörälle

Monipyörän tapauksessa muodostetaan sallitun yksikköpyöräkuorman kuvaaja, kuten paripyörän mitoitusmenetelmässä. Sen jälkeen määritetään redusoidun pyöräkuorman kuvaaja, ja päällystepaksuus määritetään samalla tavalla suorien leikkauskohdasta kuin paripyörän tapauksessa. Redusoidun pyöräkuorman ja sen kuvaajan määrittäminen monipyöräkuormitukselle on kuitenkin huomattavasti monimutkaisempaa kuin paripyörälle. Määrittäminen perustuu Huangin kehittämiin taipumakertoimiin  $F$ , joiden määrittämisestä esiteltiin kappaleessa 3.2.2. Teorian mukaan pohjamaan pinnan pystysuuntainen kokoonpuristuma etäisyydellä  $r$  kuormituskohdasta voidaan laskea kaavalla

$$w = \frac{q \times a}{E} \times F \quad (4.3)$$

jossa

$w$  on pohjamaan pinnan kokoonpuristuma (mm)  
 $q$  renkaiden kosketuspaine ( $\text{N/mm}^2$ )  
 $a$  kuormituspinnan säde (mm)  
 $F$  taipumakerroin (-)  
 $E$  pohjamaan jäykkyysmoduuli (MPa).

Kaava vastaa kappaleessa 3.2.1 esitettyä U.S. Army Corps of Engineersin laskentakaavaa 3.5 redusoidulle pyöräkuormalle Boussinesqin yksikerrosteorian mukaisessa mallissa. Monipyörän aiheuttama kokoonpuristuma voidaan määrittää superpositioperiaatteella laskemalla yksittäisten pyöräkuormien aiheuttamat kokoonpuristumat yhteen. Asphalt

Instituten menetelmä perustuu suurimman kokoonpuristuman löytämiseen monipyörän kuormittamassa rakenteessa, minkä jälkeen määritetään saman kokoonpuristuman aiheuttava redusoitu pyöräkuorma. Suurimman kokoonpuristuman määrittäminen tapahtuu iteratiivisesti lähtökohtaista päällystepaksuutta  $T_A$  eli laskentasyvyyttä muuttamalla. Suurimman kokoonpuristuman katsotaan syntyvän laskentapistessä, jossa saavutetaan maksimiarvo  $C$  yhtälölle

$$\max \sum \sqrt{P_d} \times F_d = C \quad (4.4)$$

jossa

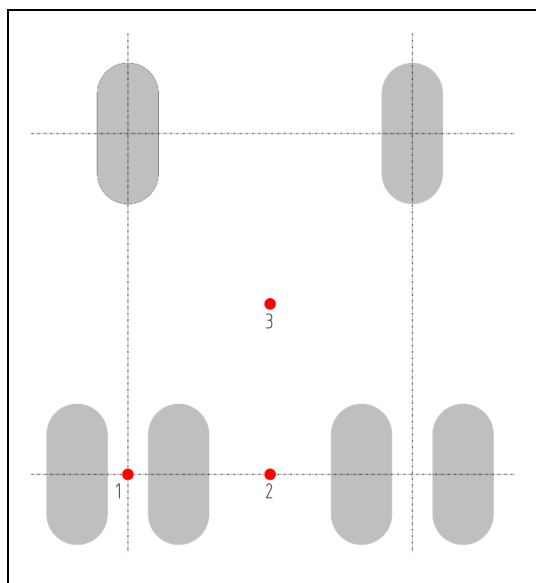
$P_d$  on monipyörän yksittäisen renkaan pyöräkuorma (kN)  
 $F_d$  monipyörän yksittäisen pyöräkuorman taipumakerroin (-).

Mitoitus voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen:

- Taipumakertoimien  $F$  määrittäminen suurimmalle kokoonpuristumalle.
- Redusoitujen pyöräkuormien määrittäminen taipumakertoimien perusteella.
- Redusoidun pyöräkuorman kuvaajan muodostaminen.

Monipyöräkuormituksen tapauksessa suurimman kokoonpuristuman määrittämisessä ei voida yksiselitteisesti määrittää, koska kokoonpuristuman arvoon vaikuttaa lukuisia eri tekijöitä. Tarkastelu suoritetaan yleisesti kolmesta kohdasta:

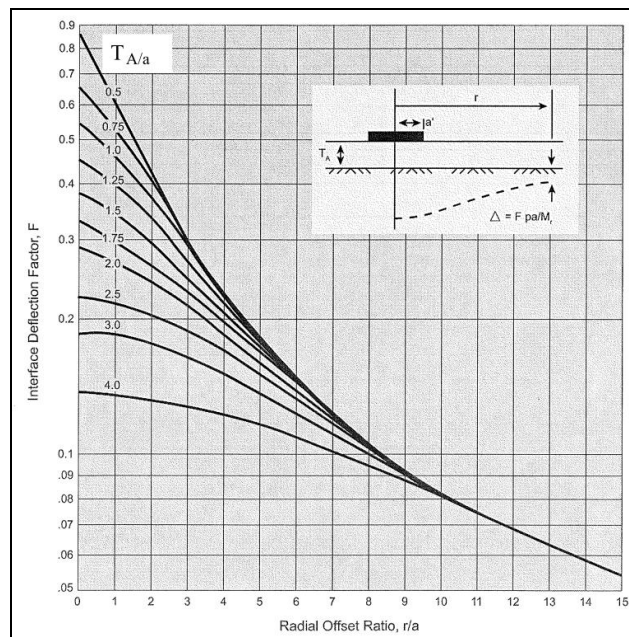
- Kahden lähekkäin olevan pyörän välistä (piste 1 kuvassa 23).
- Raskaimmin kuormitetun akselin keskeltä (piste 2 kuvassa 23).
- Monipyörämuodostelman geometrisestä keskipisteestä (piste 3 kuvassa 23).



Kuva 23. Kokoonpuristumien laskentakohdat monipyörälle.

Taipumakertoimien määrittämiseksi:

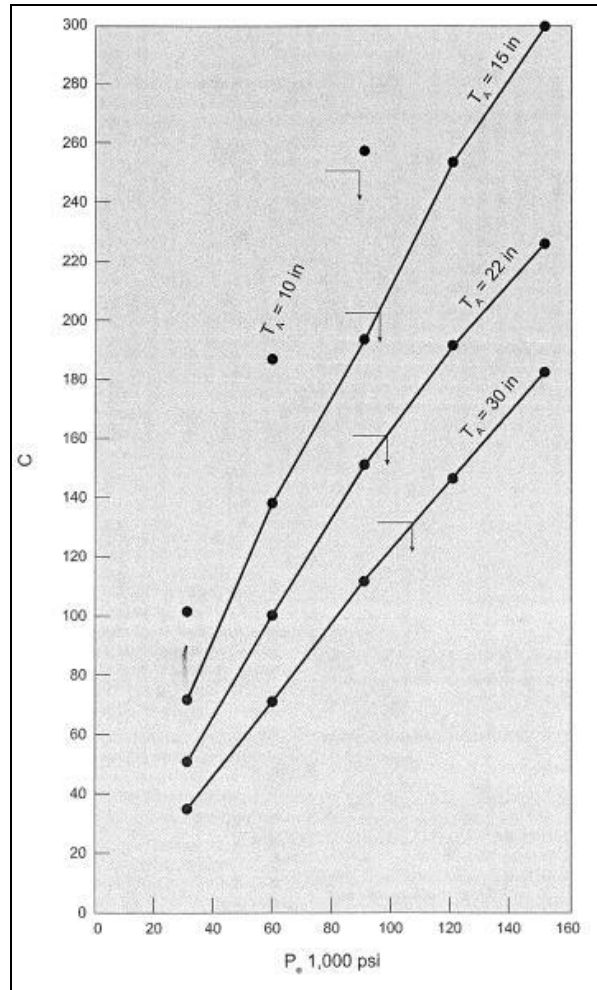
- Selvitetään jokaisen renkaan pyöräkuorma, rengaspaine ja etäisyydet kokoonpuristuman laskentakohtiin.
- Lasketaan kuormitussäde  $a$  pyöräkuorman ja rengaspaineen perusteella.
- Valitaan useampi lähtökohtainen päällystepaksuuden arvo  $T_A$  välillä  $0,5a - 2a$  suurimman pyöräkuorman (kuormitussäteen) mukaan.
- Lasketaan  $T_{A/a}$  ja  $r/a$  jokaiselle pyörälle ja määritetään niiden avulla taipumakertoimet  $F$  jokaisen pyörän kuormitukselle kuvan 24 kuvaajasta.
- Lasketaan  $\sqrt{P} \times F$  jokaiselle monipyörän pyöräkuormalle sekä niiden summa  $\sum \sqrt{P} \times F$ , joista suurin on  $C$ .



Kuva 24. Kuvaaja taipumakertoimien määrittämiseksi (Asphalt Institute, 2006).

Taipumakertoimien määrittämisen jälkeen redusoitujen pyöräkuormien määrittämiseksi:

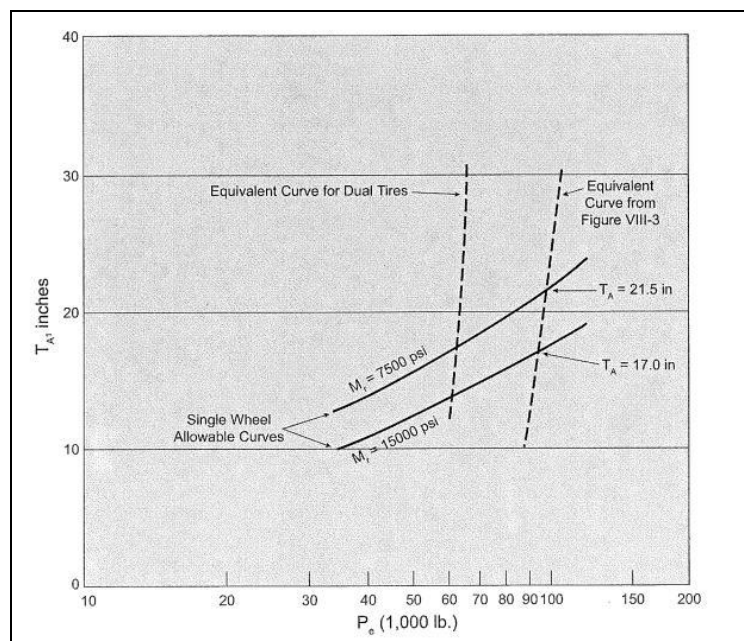
- Valitaan lähtökohtaiset redusoitujen pyöräkuormien  $P_e$  arvot, joista pienin vastaa suurinta yksittäistä pyöräkuormaa ja suurin 60 % koko kuormasta.
- Lasketaan valittuja redusoituja pyöräkuormia vastaavat kuormitussäteet  $a_e$  ja  $T_{A/a_e}$ -arvot alkuperäisen rengaspaineen  $p$  ja valittujen lähtökohtaisten päällystepaksuuksien  $T_A$  perusteella.
- Määritetään taipumakertoimet  $F_e$  redusoiduille pyöräkuormille lasketuilla  $T_{A/a_e}$ -arvoilla käyttämällä  $r/a$ -suhteena arvoa 0 (suurin kokoonpuristuma suoraan kuormituspisteen alapuolella).
- Lasketaan  $C = \sqrt{P_e} \times F_e$  ja piirretään  $C$ :n arvot  $P_e$ :n kuormituspainien funktiona eroteltuina lähtökohtaisten päällystepaksuuksien  $T_A$  perusteella (esimerkki kuvassa 25, josta tosin puuttuu 10 tuuman päällystepaksuutta vastaava viiva).



Kuva 25. C-arvot redusoidun pyöräkuorman kuormituspaineen funktiona eri päällystepaksuuksilla (Asphalt Institute, 2006).

Kuvan 25 mukaisesta diagrammista määritetään kunkin päällystepaksuuden monipyörälle laskettua  $\max \sum \sqrt{P_d} \times F_d$ -arvoa eli C:tä vastaava kuormituspaineen ja redusoidun pyöräkuorman arvo vaaka-akselilta. Päällystepaksuuden  $T_A$  arvot piirretään redusoidun pyöräkuorman  $P_e$  funktiona samaan koordinaatistoon sallitun yksikköpyöräkuorman kuvaajaan kanssa kuvan 26 mukaisesti. Kuvan viite (Figure VIII-3) viittaa kuvaan 25, jonka mukaan oikeanpuoleinen redusoidun pyöräkuorman kuvaaja on piirretty. Vaadittu päällystepaksuus saadaan sallitun yksikköpyöräkuorman ja redusoidun pyöräkuorman kuvaajien leikkauskohdasta. Laskenta on suoritettu kuvan 23 mukaiselle monipyörälle. Laskennan yksinkertaistamiseksi taka-akselin paripyörät on yhdistetty ekvivalenttipyöräksi, joten monipyörän kuormitus jakaantuu laskennassa vain neljälle pyörälle. Paripyörän redusoidun pyöräkuorman kuvaaja on kuvan 26 vasemmanpuoleinen kuvaaja.





Kuva 26. Päällystepaksuuden mitoituskuvaaja monipyöräkuormitukselle (Asphalt Institute, 2006).

## 4.2. Interpave - Englanti

Englantilainen professori Knapton teki 1970-luvulla tutkimuksia satamien konttikuormista ja sai Englannin satamajärjestöltä (British Ports Association, BPA) toimeksiannon varsinaisen mitoitusohjeen kirjoittamiseen. Ensimmäinen mitoitusohje julkaistiin vuonna 1984 ja sen päivitykset vuosina 1986, 1996 ja 2007. Vuoden 1996 mitoitusohjeessa Knapton käytti ensimmäisen kerran elementtimenetelmää rakenteiden analysoinnissa. Mitoitusohjeessa (Interpave, 2007) on käsitelty sekä konttikuormia että satamissa käytettyjen raskaiden työkoneiden kuormia. Muissa maissa on tehty englantilaiseen mitoitusohjeeseen perustuvia jatkotutkimuksia, kuten tässä tutkimuksessa käsitelty Ruotsin betoniyhdistyksen mitoitusohje (Silfwerbrand, 2005).

### 4.2.1. Laskentaperiaate ja rakennekerrosmateriaalit

Interpaven mitoitusohje (2007) on tarkoitettu betonisilla sidekivillä päällystetyille kentille. Mitoitustaulukot perustuvat elementtimenetelmällä laskettuihin vetojännityksiin ja muodonmuutoksiin sementtistabiloidussa kantavassa kerroksessa eri pyöräkuormilla ja kantavan kerroksen paksuuksilla. Kantavan kerroksen standardimateriaalina käytetään maabetonia C<sub>8/10</sub>, jonka puristuslujuus 10 MPa vastaa lujuusluokan K10 betonia. Materiaalin vetolujuus on 1,18 MPa. Ohjeessa on myös materiaalien vastaavuuskertoimia (material equivalence factor, MEF), joiden avulla rakennekerrosmateriaaleja voidaan tarvittaessa muuttaa. Hydraulisesti stabiloiduilla materiaaleilla vastaavuuskertoimen laskentaan käytetään vetolujuutta ja bitumistabiloiduilla sekä stabiloimattomilla materiaaleilla jäykkyysmoduuleja. Laskennassa on kuitenkin otettava huomioon, että materiaalien vetolujuus on useimmilla materiaaleilla huomattavasti jäykkyysmoduuleja pienempi. Vastaavuuskerroin lasketaan kaavalla

$$MEF = \sqrt{\frac{E}{E_{uusi}}} \quad (4.5)$$

jossa

MEF on korvaavan materiaalin vastaavuuskerroin (-)  
E maabetonin vetolujuus 1,18 MPa  
E<sub>uusi</sub> korvaavan materiaalin vetolujuus tai jäykkyysmoduuli (MPa).

Elementtimenetelmällä tehdyissä laskennoissa käytettiin taulukossa 2 esitettyjä rakennekerroksia ja materiaaleja. Todellisuudessa paksuudeltaan 80 mm betonikiven alla on 30 mm kerros asennushiekkaa, mutta laskentaa varten nämä yhdistettiin 110 mm paksuksi kerrokseksi jäykkyydeltään 4000 MPa. Ohjeen mitoitusaulukot on laadittu analysoimalla perinteisiä rakennettuja tiekerroksia elementtimenetelmällä, jolla on laskennallisesti määritetty maabetonin sallitut vetojännitykset eri kuormitusmäärillä. Kuormituksena laskennoissa on käytetty 70 kN redusoitua pyöräkuormaa. Sallitut jännitykset eri kuormitusmäärillä on esitetty taulukossa 3. Mitoitusohjeessa ei ole kuitenkaan kerrottu kontikuormille käytettyjä sallittuja vetojännityksiä tai muuta mitoituskriteeriä.

Taulukko 2. Elementtimenetelmälaskennoissa käytetyt materiaaliparametrit (Interpave, 2007)

| Rakennekerros             | Jäykkyysmoduuli [MPa] | Poisson-luku |
|---------------------------|-----------------------|--------------|
| Betonikivipäällyste       | 4000                  | 0,15         |
| Kantava kerros, maabetoni | 40 000                | 0,15         |
| Jakava kerros             | 500                   | 0,30         |
| Tukikerros (capping)      | 250                   | 0,35         |
| Pohjamaa                  | 10 x CBR              | 0,40         |

Taulukko 3. Sallitut vetojännitykset eri kuormitusmäärillä (Interpave, 2007)

| Kuormituskerrat, miljoonaa kuormitusta | Vetojännitys [MPa] |
|--|--------------------|
| 8 - 12                                 | 0,5                |
| 4 - 8                                  | 0,7                |
| 1,5 - 4                                | 0,9                |
| 0,25 - 1,5                             | 1,1                |
| 0 - 0,25                               | 1,3                |

Mitoitusohjetta varten suoritettiin uudet laskennat samalla elementtimenetelmämallilla käyttäen raskaampia kuormituksia ja paksumpia kantavia kerroksia. Laskennat tehtiin eri kuormituskertojen määrällä ja sallittuina vetojännityksinä käytettiin taulukon 3 arvoja. Tuloksena syntyivät taulukot seitsemälle eri kantavan kerroksen paksuudelle kuormitusvälillä 50 - 750 kN.

#### 4.2.2. Mitoituskuormat pyöräkuormille

Tavallisilla ajoneuvoilla liikennöidyille kentille mitoitusohje ehdottaa 14 t mitoitusakselia. Muissa tapauksissa mitoitus perustuu kriittiseen konttikuormaan, joka aiheuttaa rakenteeseen suurimman vaurion. Mitoituskuorman suuruus määräytyy kohteessa käytettyjen työkoneiden oman massan ja kriittiseen konttikuorman perusteella. Kriittinen konttikuorma määritetään kohteen konttikokojakauman perusteella. Mitoitusohjeessa esitetyt painojakaumat perustuvat Knaptonin 1970-luvulla tekemiin tutkimuksiin, joten ne eivät välttämättä pidä nykyään täysin paikkaansa. Toisaalta mitoitusohjeessa käytetyt mitoituskuormat vastaavat 70 - 80 % täydestä kuormasta, kun ne olivat Asphalt Instituten (2006) käyttämässä tutkimuksessa 60 % täydestä kuormasta. Massajakauma eri konttikokojen jakaumilla on esitetty taulukossa 4. Oikeassa sarakkeessa on esitetty mahdolliset konttien massat välillä 0 - 34 t ja ylhäällä konttien kokojakauma 40 ja 20 jalan konttien välillä.

Taulukko 4. Konttien massojen jakauma eri konttikokojen jakaumilla (Interpave, 2007)

| Kontin<br>massa<br>[kg] | Konttien kokojakauma 40 / 20 jalkaa |              |              |              |              | Kontin<br>massa<br>[kg] | Konttien kokojakauma 40 / 20 jalkaa |              |              |              |              |
|-------------------------|-------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------|-------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                         | 100/0<br>[%]                        | 60/40<br>[%] | 50/50<br>[%] | 40/60<br>[%] | 0/100<br>[%] |                         | 100/0<br>[%]                        | 60/40<br>[%] | 50/50<br>[%] | 40/60<br>[%] | 0/100<br>[%] |
| 0                       | 0,00                                | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 18000                   | 5,55                                | 5,91         | 6,00         | 6,10         | 6,46         |
| 1000                    | 0,00                                | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 19000                   | 6,08                                | 6,68         | 6,83         | 6,98         | 7,58         |
| 2000                    | 0,00                                | 0,18         | 0,23         | 0,28         | 0,46         | 20000                   | 7,67                                | 8,28         | 8,43         | 8,58         | 9,19         |
| 3000                    | 0,00                                | 0,60         | 0,74         | 0,89         | 1,49         | 21000                   | 10,40                               | 8,93         | 8,56         | 8,18         | 6,72         |
| 4000                    | 0,18                                | 1,29         | 1,57         | 1,84         | 2,95         | 22000                   | 9,95                                | 7,60         | 7,02         | 6,43         | 4,08         |
| 5000                    | 0,53                                | 1,90         | 2,25         | 2,59         | 3,96         | 23000                   | 5,53                                | 4,31         | 4,00         | 3,69         | 2,47         |
| 6000                    | 0,98                                | 2,17         | 2,46         | 2,76         | 3,94         | 24000                   | 2,75                                | 1,75         | 1,50         | 1,25         | 0,24         |
| 7000                    | 1,37                                | 2,41         | 2,67         | 2,93         | 3,97         | 25000                   | 0,95                                | 0,63         | 0,55         | 0,47         | 0,15         |
| 8000                    | 2,60                                | 3,05         | 3,16         | 3,27         | 3,72         | 26000                   | 0,67                                | 0,40         | 0,33         | 0,27         | 0,00         |
| 9000                    | 2,82                                | 3,05         | 3,11         | 3,17         | 3,41         | 27000                   | 0,72                                | 0,43         | 0,36         | 0,29         | 0,00         |
| 10000                   | 3,30                                | 3,44         | 3,48         | 3,52         | 3,66         | 28000                   | 0,53                                | 0,32         | 0,27         | 0,21         | 0,00         |
| 11000                   | 4,43                                | 4,28         | 4,24         | 4,20         | 4,04         | 29000                   | 0,43                                | 0,26         | 0,22         | 0,17         | 0,00         |
| 12000                   | 5,73                                | 5,24         | 5,12         | 4,99         | 4,50         | 30000                   | 0,28                                | 0,17         | 0,14         | 0,11         | 0,00         |
| 13000                   | 5,12                                | 4,83         | 4,76         | 4,69         | 4,41         | 31000                   | 0,03                                | 0,02         | 0,02         | 0,01         | 0,00         |
| 14000                   | 5,85                                | 5,38         | 5,26         | 5,14         | 4,67         | 32000                   | 0,03                                | 0,02         | 0,02         | 0,01         | 0,00         |
| 15000                   | 4,78                                | 5,12         | 5,21         | 5,29         | 5,63         | 33000                   | 0,00                                | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,00         |
| 16000                   | 5,22                                | 5,58         | 5,67         | 5,76         | 6,13         | 34000                   | 0,05                                | 0,03         | 0,02         | 0,02         | 0,00         |
| 17000                   | 5,45                                | 5,75         | 5,83         | 5,91         | 6,21         | Summa                   | ≈ 100                               | ≈ 100        | ≈ 100        | ≈ 100        | ≈ 100        |

Kriittisen konttikuorman mitoitus tapa on käytössä siitä syystä, että suurempi kuorma saattaa aiheuttaa suuremman vaurion kuin pienempi, mutta useammin esiintyvä kuorma. Vaurion suuruutta arvioidaan vauriokertoimen D avulla, joka lasketaan kaavalla

$$D = \left( \frac{P}{12000} \right)^{3,75} \times \left( \frac{p}{0,8} \right)^{1,25} \times N_C \quad (4.6)$$

jossa

|                |   |
|----------------|---|
| D              | on vauriokerroin (-)                              |
| P              | tiettyä konttipainoa vastaava pyöräkuorma (kg)    |
| p              | rengaspaine (N / mm <sup>2</sup> )                |
| N <sub>C</sub> | prosenttiluku taulukosta 4 konttijakauman mukaan. |

Mitoittavaksi kuormaksi valitaan kuorma, jolla on suurin laskennallinen vauriokerroin. Knaptonin tutkimusten mukaan alustavassa mitoituksessa kriittisenä konttikuormana voidaan käyttää:

- 20 t, kun kaikki kontit ovat 20 jalkaa.
- 21 t, kun jakauma 20 ja 40 jalan konteille on 50/50 %.
- 22 t, kun kaikki kontit ovat 40 jalkaa.

Kuormituskertojen määrä voidaan laskea käyttämällä kertoimia erisuuruksille kuormille tai likimääräisesti toimintaan perustuvan liikennemäärän mukaan. Renkaan kuormituspinta oletetaan ympyrän muotoiseksi ja kosketuspaine rengaspaineen suuruiseksi. Rengaspaineen on oletettu olevan 1,0 N/mm<sup>2</sup> ilmatäytteisille renkailla ja 1,7 N/mm<sup>2</sup> täyskumirenkailla. Mitoitusohjeessa on esitetty laskentakaaavat erilaisten trukkien ja nostureiden pyöräkuormien määrittämiseksi.

Redusoitu pyöräkuorma lasketaan redusoidun pyöräkuorman laskentakertoimen (wheel proximity factor, WPF) avulla, joka määritetään renkaiden keskeltä-keskelle -välin ja pohjamaan tehollisen syvyyden avulla. Redusoidun pyöräkuorman laskentakertoimet lasketaan erikseen kullekin mitoitusakselin renkaalle suhteessa ensisijaiseen pyöräkuormaan. Liitteessä N.2 esitetyissä mitoituslaskennassa on laskentaesimerkki vastapainotrukin redusoidun pyöräkuorman määrittämisestä. Laskentakertoimien määrittämiseksi ensisijaisen pyöräkuorman synnyttämään säteittäiseen vaakasuoraan vetojännitykseen lisätään toisesta pyöräkuormasta aiheutuva tangentiaalinen vaakasuora vetojännitys. Laskentakerroin saadaan vetojännitysten summan ja ensisijaisen pyöräkuorman vetojännityksen osamääränä kaavoilla

$$WPF = \frac{\sigma_R + \sigma_T}{\sigma_R} \quad (\text{Tarkistettava, että } 1 \leq WPF < 2) \quad (4.7)$$

$$\sigma_R = \frac{P}{2 \times \pi} \times \left( \frac{3 \times S_d^2 \times z}{\alpha^{5/2}} - \frac{1 - 2 \times \nu}{\alpha + z \times \sqrt{\alpha}} \right) \quad (4.8)$$

$$\sigma_T = \frac{P}{2 \times \pi} \times (1 - 2 \times \nu) \times \left( \frac{z}{\alpha^{3/2}} - \frac{1}{\alpha + z \times \sqrt{\alpha}} \right) \quad (4.9)$$

joissa

|            |   |
|------------|---|
| WPF        | on redusoidun pyöräkuorman laskentakerroin (-)                                |
| $\sigma_R$ | säteittäinen vaakasuora vetojännitys ensisijaisesta mitoituspöörästä (MPa)    |
| $\sigma_T$ | tangentiaalinen vaakasuora vetojännitys toissijaisesta mitoituspöörästä (MPa) |
| P          | pyöräkuorma (N)   |
| $S_d$      | pyörien keskeltä-keskelle -väli (mm)  |
| z          | jännitysten laskentasyvyys, tehollinen syvyys (mm)                            |
| $\nu$      | Poisson-luku (-)  |
| $\alpha$   | $r^2 + z^2$ (mm <sup>2</sup> ).   |

Leikkausjännitysten laskentasyvyytenä z käytetään tehollista syvyyttä, joka vastaa pohjamaan materiaalista tehdyn laatan syvyyttä. Tehollinen syvyys lasketaan Odemarkin ekvivalenttiyhtälöstä johdetulla kaavalla

$$h_{\text{eff}} = 300 \times \sqrt[3]{\frac{35000}{\text{CBR} \times 10}} \quad (4.10)$$

jossa

|                  |                           |
|------------------|---------------------------|
| $h_{\text{eff}}$ | on tehollinen syvyys (mm) |
| CBR              | pohjamaan CBR-arvo (%).   |

Liitteessä N.2 esitetyssä mitoituksessa kuitenkin ilmeni, että kaavat 4.7, 4.8 ja 4.9 ovat käyttökelpoisia ainoastaan tietyllä jännitysalueella. Kaavojen käyttö on epävarmaa erityisesti pienillä keskeltä-keskelle -väleillä ja pehmeitä pohjamaita vastaavilla suurilla laskentasyvyyksillä. Mitoitusohjeen mukaiset redusoidun pyöräkuorman laskentakertoimet eri keskeltä-keskelle -väleillä ja laskentasyvyyksillä on esitetty taulukossa 5. Ohjeen laskentaesimerkeissä väleistä puuttuvat arvot on määritetty interpoloimalla.

Taulukko 5. Redusoidun pyöräkuorman laskentakertoimien määritystaulukko (Interpave, 2007)

| K-k -<br>väli<br>[mm] | Tehollinen syvyys $h_{\text{eff}}$<br>(laskentasyvyys) |         |         |
|-----------------------|--|---------|---------|
|                       | 1000 mm  | 2000 mm | 3000 mm |
| 300                   | 1,82   | 1,95    | 1,98    |
| 600                   | 1,47   | 1,82    | 1,91    |
| 900                   | 1,19   | 1,65    | 1,82    |
| 1200                  | 1,02   | 1,47    | 1,71    |
| 1800                  | 1,00   | 1,19    | 1,47    |
| 2400                  | 1,00   | 1,02    | 1,27    |
| 3600                  | 1,00   | 1,00    | 1,02    |
| 4800                  | 1,00   | 1,00    | 1,00    |

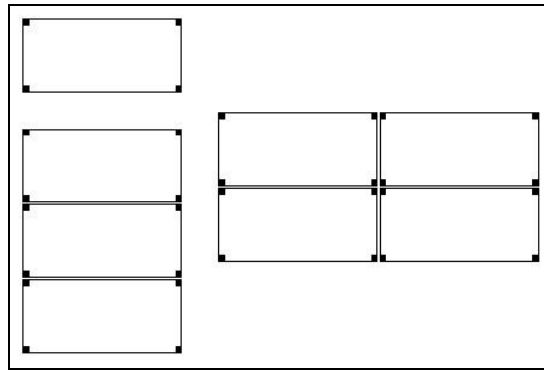
Kääntymisistä, jarrutuksista, kiihdytyksistä ja pinnan epätasaisuudesta johtuvat ylimääräiset kuormitukset otetaan huomioon taulukossa 6 esitettyjen dynaamisen kuormituslisän arvoilla. Jarrutushetkellä kuormitus lisääntyy etupyörien osalta ja vähenee takapyörien osalta. Useammassa päällekkäisessä tapauksessa kertoimet lasketaan yhteen. Lopullinen mitoittava pyöräkuorma lasketaan kertomalla akselin yksittäisen pyöräkuorman arvo redusoidun pyöräkuorman laskentakertoimella ja dynaamisella kuormituslisällä.

Taulukko 6. Dynaamisen kuormituslisän  $f_d$  arvot (Interpave, 2007)

| Syy               | Mitoitusajoneuvo                    | $f_d$ [%] |
|-------------------|-------------------------------------|-----------|
| Jarrutus          | Vastapainotrukki ja konttikurottaja | $\pm 30$  |
|                   | Lukkitrukki                         | $\pm 50$  |
|                   | Sivukuormaaja                       | $\pm 20$  |
|                   | Terminaalitraktori ja traileri      | $\pm 10$  |
|                   | Kumipyöräinen portaalinosturi       | $\pm 10$  |
| Kääntyminen       | Vastapainotrukki ja konttikurottaja | 40        |
|                   | Lukkitrukki                         | 60        |
|                   | Sivukuormaaja                       | 30        |
|                   | Terminaalitraktori ja traileri      | 30        |
|                   | Kumipyöräinen portaalinosturi       | 0         |
| Kiihdytys         | Vastapainotrukki ja konttikurottaja | 10        |
|                   | Lukkitrukki                         | 10        |
|                   | Sivukuormaaja                       | 10        |
|                   | Terminaalitraktori ja traileri      | 10        |
|                   | Kumipyöräinen portaalinosturi       | $\pm 5$   |
| Epätasainen pinta | Vastapainotrukki ja konttikurottaja | 20        |
|                   | Lukkitrukki                         | 20        |
|                   | Sivukuormaaja                       | 20        |
|                   | Terminaalitraktori ja traileri      | 20        |
|                   | Kumipyöräinen portaalinosturi       | $\pm 10$  |

#### 4.2.3. Mitoituskuormat konttikuormille

Staattisten konttikuormien suuruus vaihtelee konttien täyttöasteen ja konttipinon korkeuden mukaan. Konttipinon mitoituskuormana ei pidetä kuitenkaan täyttä kuormaa, koska korkeassa konttipinossa kaikkien konttien ei oleteta olevan täysiä. Mitoituskuormaa pienennetään maksimikuormasta konttipinon korkeudesta riippuvalla vähennyskertoimella. Taulukossa 7 on esitetty Interpaven mitoitusohjeen mukaiset vähennyskertoimet ja konttikuormitukset erilaisilla konttimuodostelmilla. Erilaiset muodostelmat ovat kuvan 27 mukaisesti yksittäinen kontti tai konttipino, konttirivi ja konttiryhmä. Tyhjiä konttien tapauksessa 40 jalan kontin massa on 3800 kg ja 20 jalan kontin massa 2500 kg. Mitoitusohjeessa konttijalkojen mitat ovat 178 x 162 mm<sup>2</sup>.



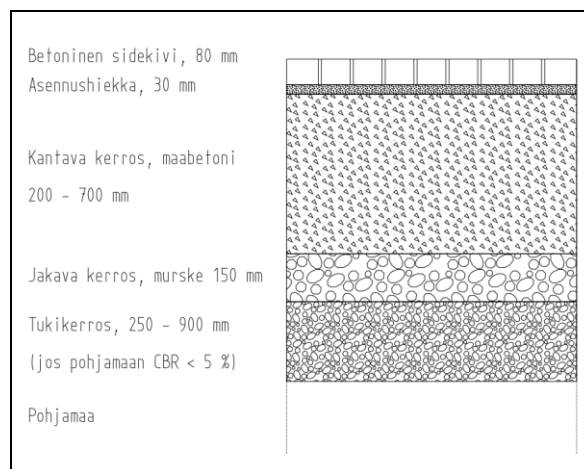
Kuva 27. Konttimuodostelmat (Interpave, 2007).

Taulukko 7. Yksittäisen konttitassun kuormitus erilaisilla konttimuodostelmilla (Interpave, 2007)

| Kontteja<br>päällekkäin | Vähennys<br>maksimi-<br>painosta [%] | Kuorma [kN] erilaisilla<br>muodostelmilla |       |        |
|-------------------------|--------------------------------------|---|-------|--------|
|                         |                                      | Yksittäinen                               | Rivi  | Ryhmä  |
| 1                       | 0                                    | 76,2                                      | 152,4 | 304,8  |
| 2                       | 10                                   | 137,2                                     | 274,3 | 548,6  |
| 3                       | 20                                   | 182,9                                     | 365,8 | 731,5  |
| 4                       | 30                                   | 213,4                                     | 426,7 | 853,4  |
| 5                       | 40                                   | 228,6                                     | 457,2 | 914,4  |
| 6                       | 40                                   | 274,3                                     | 548,6 | 1097,0 |
| 7                       | 40                                   | 320,0                                     | 640,0 | 1280,0 |
| 8                       | 40                                   | 365,8                                     | 731,6 | 1463,0 |

#### 4.2.4. Rakennekerrosten mitoitus

Mitoitusmenetelmässä perusrakenne muodostuu betonisesta sidekivistä, asennushiekasta, kantavasta ja jakavasta kerroksesta sekä heikosti kantavilla pohjamailla tukikerroksesta (capping). Perusrakenne ja rakennekerrospaksuuksien vaihteluvälit on esitetty kuvassa 28.



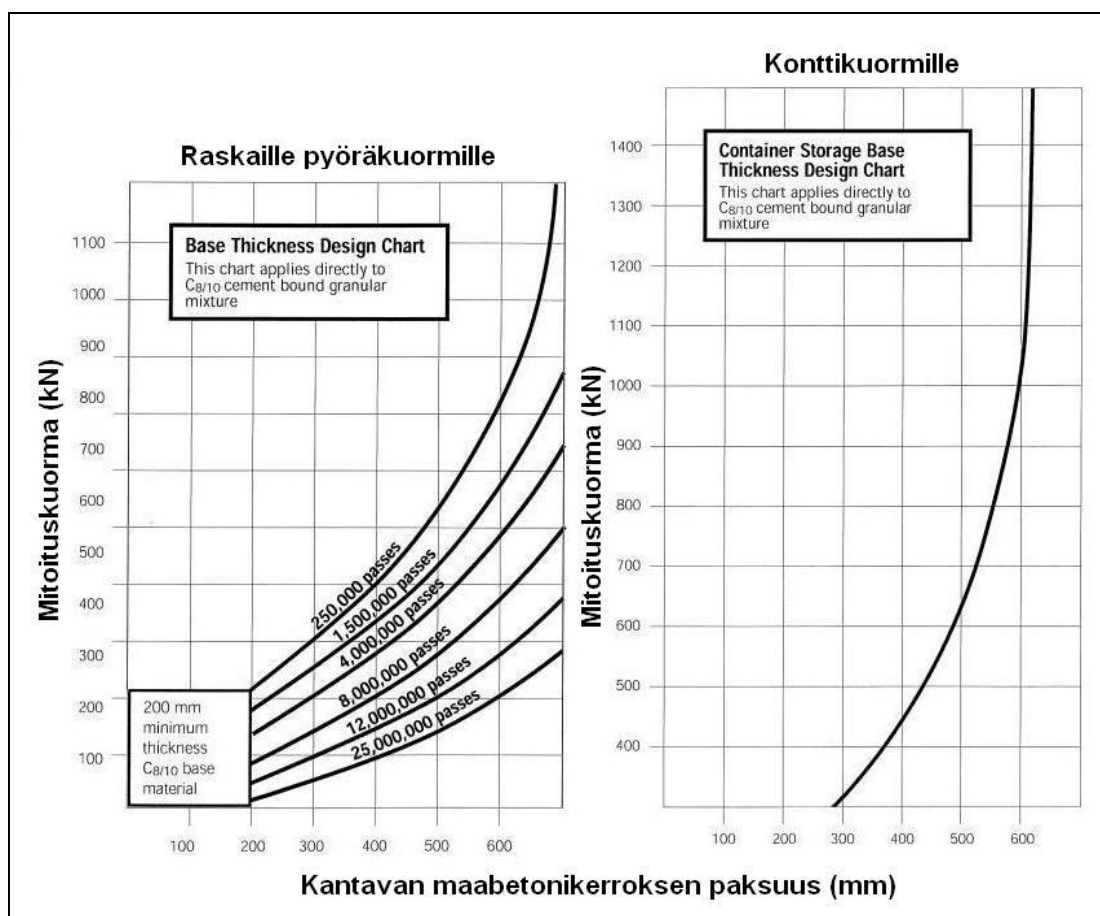
Kuva 28. Mitoitusmenetelmän mukainen perusrakenne (Interpave, 2007).

Rakennekerrosten mitoitus aloitetaan tukikerroksen paksuuden määrittämisellä, mikä tehdään pohjamaan kantavuuden perusteella. Tukikerroksen on tarkoitus toimia työalustana raskaille koneille sekä estää heikosta pohjamaasta aiheutuvat liian suuret jännitykset kantavassa kerroksessa. Taulukossa 8 on esitetty tukikerroksen paksuus pohjamaan kantavuuksilla. Jakavan kerroksen on oletettu olevan mursketta, jonka CBR-arvo on 80 %. Sen paksuus on jokaisessa vaihtoehdossa 150 mm.

Taulukko 8. Tukikerroksen mitoitus (Interpave, 2007)

| CBR-arvo [%] | Tukikerros [mm] | Jakava kerros [mm] |
|--------------|-----------------|--------------------|
| 1            | 900             | 150                |
| 2            | 600             | 150                |
| 3            | 400             | 150                |
| 4            | 250             | 150                |
| yli 5        | -               | 150                |

Kantavan kerroksen mitoitus perustuu mitoituskuormaan. Kuvassa 29 on esitetty kantavan kerroksen mitoituskuvaajat pyöräkuormille ja konttikuormille tehtävää mitoitusta varten.



Kuva 29. Kantavan kerroksen mitoituskuvaajat (Muokattu lähteestä Interpave, 2007).



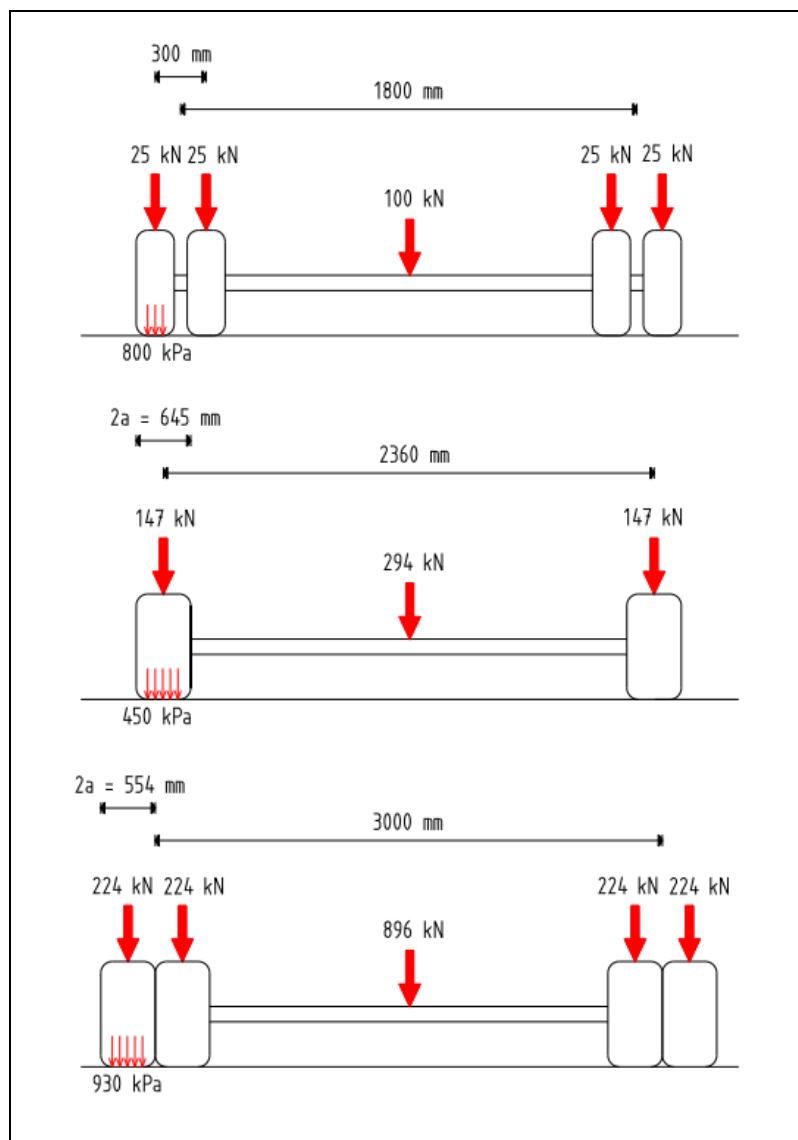
### 4.3. Betonginstitutet, CBI - Ruotsi

Ruotsalainen professori Silfwerbrand alkoi 1990-luvulla kehittää mitoitusmenetelmää yhteistyössä Ruotsin betoniyhdistyksen (CBI) ja Ruotsin kansallisen tie- ja liikennealan tutkimusinstituutin (VTI) kanssa. Silfwerbrand (2005) muodosti VTI:n Håkan Carlssonin tekemien BISAR -laskentaraporttien (2001 & 2003) perusteella mitoitusaulukot kolmelle raskaalle pyöräkuormalle ja Interpaven mitoitusohjeen (2007) mukaisille konttikuormille.

#### 4.3.1. Mitoituskuormat

Mitoittavat pyöräkuormat on esitetty kuvassa 30 ja ne olivat

- ruotsalainen kuorma-auton standardiakseli 100 kN (10 t)
- pyöräkuormain (Cat 980C) 294 kN (30 t)
- vastapainotrukki (Svetruck 42120-57) 896 kN (90 t).



Kuva 30. Ruotsalaiset raskaan kuormituksen mitoitusakselit (Silfwerbrand, 2005).

Mitoitustaulukoiden teossa dynaamisia kuormituslisiä ei otettu huomioon, koska niiden vastaavuutta todellisiin kuormituksiin ei ole todennettu esimerkiksi kenttämittauksin. Raportissa todetaan kuitenkin syvällisempi tarkastelu tarpeelliseksi, jos erityisen suuria dynaamisia kuormia on mitoituskohteessa odotettavissa.

Mitoitustaulukoiden konttikuormat perustuvat Interpaven mitoitusohjeeseen (2007). CBI:n mitoitustaulukot on tehty suurimmillaan viiden kontin pinolle kolmella eri konttimuodostelmalla, jotka vastaavat Interpaven määrittämiä. Laskentoja varten Interpaven mitoitusohjeen mukaiset suorakulmion muotoiset konttijalat mitoiltaan  $178 \times 162 \text{ mm}^2$  muutettiin pinta-alaltaan yhtä suuriksi ympyrän muotoisiksi poikkileikkauksiksi, joiden säteet olivat 95,8 mm. Laskennoissa käytetyt kuormituspainet on esitetty taulukossa 9. Jännitysten ja muodonmuutosten laskennassa konttien pitkäaikaikuormat otettiin huomioon käyttämällä staattisia jäykkyysmoduulin arvoja.

Taulukko 9. Laskennoissa käytetyt konttikuormien kuormituspainet (Silfwerbrand, 2005)

| Kontteja päällekkäin | 1 kontti | 2 konttia | 3 konttia | 4 konttia | 5 konttia |
|----------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Kuormituspaine [MPa] | 2,64     | 4,76      | 6,34      | 7,40      | 7,93      |

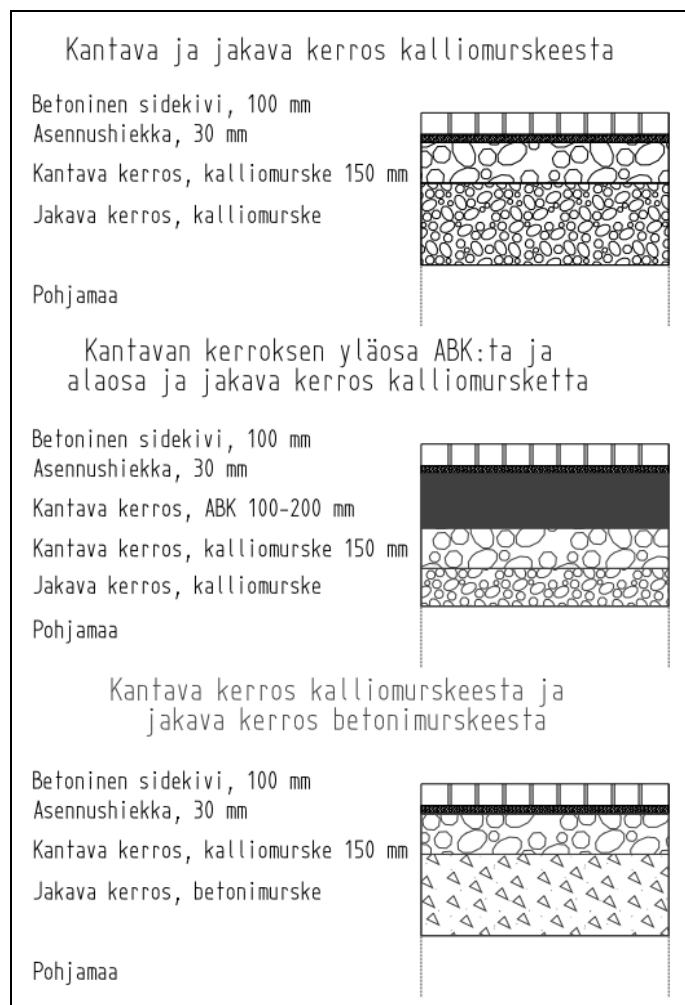
#### 4.3.2. Rakennekerrosvaihtoehdot ja materiaaliparametrit

Liikennekuormituksella sallitut kuormitusmäärät laskettiin erikseen keväälle, kesälle ja syksylle. Tämän jälkeen kokonaiskuormitusmäärä laskettiin Minerin lain perusteella. Raporteissa (Carlsson, 2003. Silfwerbrand, 2005) ei kuitenkaan kerrota Minerin laskentakaavassa käytettyä päiväkohtaista vakiokuormitusmäärää tai kausittaisia kuormitusmääriä, joilla kokonaiskuormitusmäärä on laskettu. Pitkäaikaikuormitukselle laskenta-aikana käytettiin pelkästään kevättä. Bitumistabiloidun kantavan kerroksen jäykkyysmoduuli ja pohjamaan jäykkyysmoduuli määrytyivät vuodenajan mukaan sekä bitumistabiloidun kantavan kerroksen väsymiskestävyys kantavan kerroksen lämpötilan mukaan. Roudan syvyytenä pidettiin kahta metriä, jonka alapuolella pohjamaan jäykkyysmoduulille käytettiin kesäarvoja koko vuodelle. Pitkäaikaikuormituksen laskennoissa käytettävät staattiset jäykkyysmoduulit on myös annettu erikseen routivalle ja routimattomalle osalle pohjamaata. Vuodenaikojen pituudet ja asfalttibetonin lämpötilat on esitetty taulukossa 10, ja ne vastaavat Ruotsin ilmastoalueen 2 arvoja. Nykyään Ruotsi on jaettu viiteen ilmastoalueeseen (Vägverket, 2005a), jotka on esitetty kartalla liitteessä B.

Taulukko 10. Vuodenaikojen pituudet ja päällysteen lämpötilat (Carlsson, 2003)

| Vuodenaika        | Vuodenaajan pituus [d] | ABK:n lämpötila [°C] |
|-------------------|------------------------|----------------------|
| Kevät             | 30                     | 2,3                  |
| Kesä              | 155                    | 18,1                 |
| Syksy             | 90                     | 3,8                  |
| Roudan syvyys [m] | 2,0                    |                      |

Mitoitustaulukot on laadittu kolmelle betonikivipäällysteiselle rakennekerrostyypille, jotka on esitetty kuvassa 31. Ruotsalainen mitoitusmenetelmä perustuu jakavan kerroksen paksuuden määrittämiseen. Kantavan asfalttibetonikerroksen paksuus riippuu kuormituksesta taulukon 11 mukaisesti.



Kuva 31. Mitoitustaulukoiden rakennekerrostyypit (Silfwerbrand, 2005).

Taulukko 11. Kantavan asfalttibetonikerroksen paksuus (Silfwerbrand, 2005).

| Kuormitus              | ABK-kerroksen paksuus [mm] |
|------------------------|----------------------------|
| Standardiakseli, 10 t  | 100                        |
| Pyöräkuormain, 30 t    | 150                        |
| Vastapainotrukki, 90 t | 200                        |
| Konttikuormitus        | 150                        |

Rakennekerrosmateriaalien jäykkyysmoduulit on esitetty taulukossa 12. Laskennoissa ei otettu huomioon sitomattomien rakennekerrosten jäykkyysmoduulien jännitystilariippuvuutta. Poisson-luku on kaikilla materiaaleilla 0,35.

Taulukko 12. Materiaaliparametrit (Silfwerbrand, 2005)

|                        | Liikennekuormitus     |      |       | Pitkäaikaiskuormitus<br>(konttikuorma), kevät |
|------------------------|-----------------------|------|-------|---|
|                        | Kevät                 | Kesä | Syksy |   |
| Materiaali             | Jäykkyysmoduuli [MPa] |      |       |   |
| Betonikivi             | 6000                  | 6000 | 6000  | 2000  |
| Asennushiekka          | 70                    | 100  | 100   | 23  |
| Kantava kerros, ABK    | 10000                 | 3000 | 9000  | 150   |
| Kantava kerros, murske | 450                   | 450  | 450   | 150   |
| Jakava kerros          | 350                   | 350  | 350   | 117   |
| Betonimurske, 1. vuosi | 450                   | 450  | 450   | 150   |
| Betonimurske, muut     | 900                   | 900  | 900   | 300   |

Pohjamaan luokitus vastaa ruotsalaisissa tierakenteen mitoitusohjeissa (Vägverket, 2005b) käytettyjä pohjamaaluokkia. Pohjamaaluokkien jäykkyysmoduulit on esitetty taulukossa 13. Laskennoissa pohjamaa jaettiin routivaan ja routimattomaan osaan kahden metrin routasyvyyden mukaan. Ylemmälle osalle käytettiin kevätarvoja kevätkaudella ja alemmalle osalle kesä-/syysarvoja myös keväällä. Pitkäaikaikuormituksessa käytettiin pienempiä jäykkyysmoduuleja alle 2,0 m syvyydellä.

Taulukko 13. Pohjamaaluokat (Silfwerbrand, 2003)

|                | Liikennekuormitus     |              | Pitkäaikaikuormitus<br>(konttikuorma) |                  |
|----------------|-----------------------|--------------|---------------------------------------|------------------|
|                | Kevät                 | Kesä / syksy | Kevät, h < 2,0 m                      | Kevät, h > 2,0 m |
| Pohjamaaluokka | Jäykkyysmoduuli [MPa] |              |                                       |                  |
| 1              | 150                   | 150          | 50                                    | 50               |
| 2              | 70                    | 100          | 23                                    | 33               |
| 3              | 35                    | 100          | 12                                    | 33               |
| 4              | 30                    | 50           | 10                                    | 17               |
| 5              | 10                    | 45           | 3,3                                   | 15               |

### 4.3.3.Mitoitus pyöräkuormille

Kaikille rakennevaihtoehdoille käytettiin VTI:n mitoituskriteeriä pohjamaan puristusmuodonmuutokselle ja ABK-rakenteille lisäksi Vägverketin mitoituskriteeriä kantavan kerroksen asfalttibetonin alapinnan vetomuodonmuutokselle. Sidotun kantavan kerroksen väsymiskriteeri muodostui kriittiseksi kuitenkin ainoastaan 90 t mitoituskuormalla. ABK:n väsymiskriteerin mukaiset mitoitusuorat ovat kuvassa 32 esitetyt jyrkemmät kuvaajat 90 t mitoituskuormalla. Sallittujen kuormitusten määrät laskettiin kaavoilla

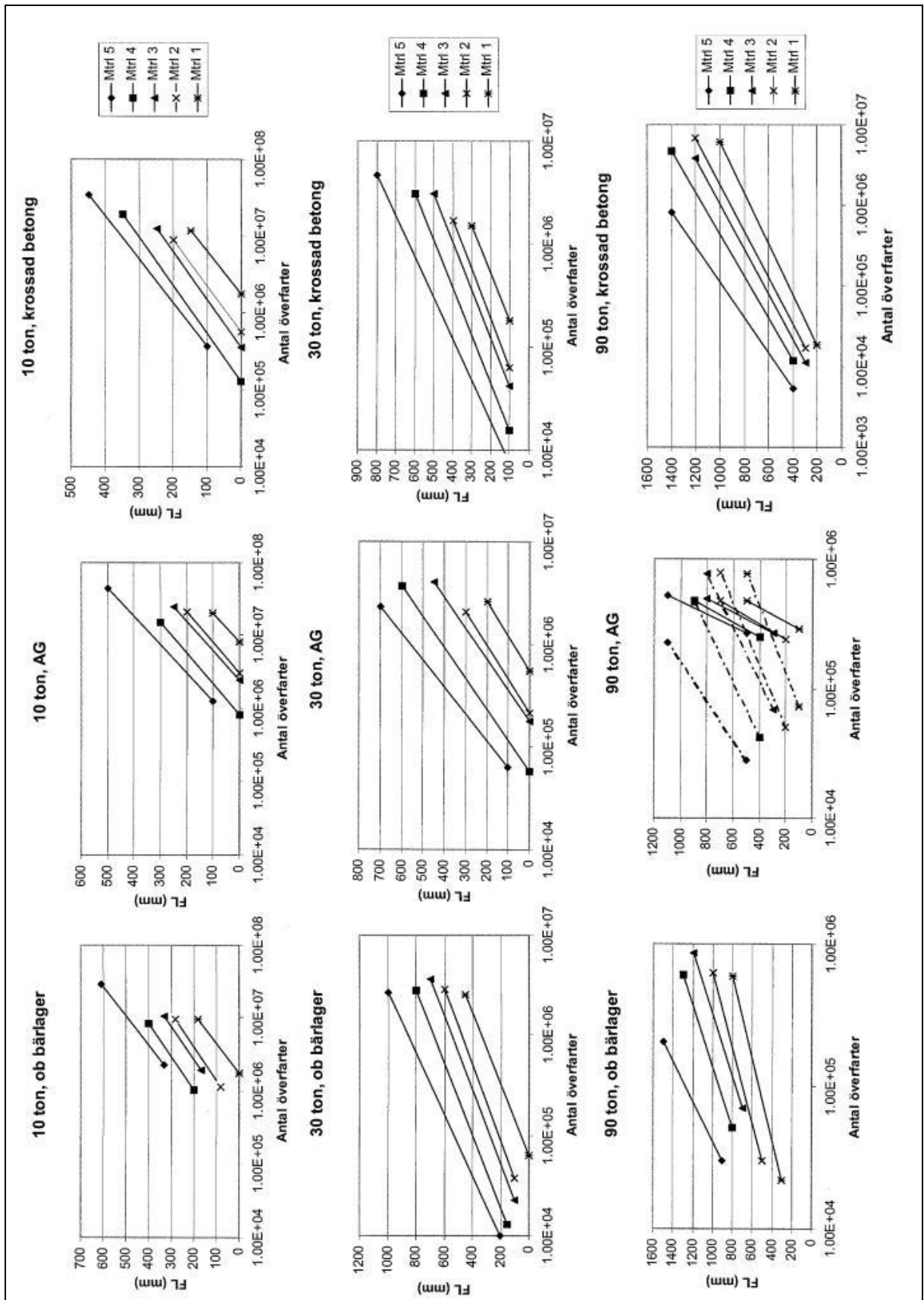
$$N = \frac{1,4 \times 10^{-7}}{\varepsilon_z^4} \text{ Pohjamaa} \quad (4.11)$$

$$N = \frac{2,37 \times 10^{-22} \times 1,16^{(1,8t+32)}}{\varepsilon_y} \text{ Kantavan kerroksen asfalttibetoni} \quad (4.12)$$

joissa

|                 |   |
|-----------------|---|
| N               | on sallittu kuormituskertojen määrä (kpl)       |
| t               | kantavan asfalttibetonikerroksen lämpötila (°C) |
| $\varepsilon_z$ | puristusmuodonmuutos pohjamaan pinnalla (m/m)   |
| $\varepsilon_y$ | vetomuodonmuutos ABK:n alapinnalla (m/m).       |

Sallitut kuormitusmäärät laskettiin jokaiselle rakennevaihtoehdolle ja kuormitukselle kahdella lähtökohtaisella jakavan kerroksen paksuudella, joista pienempi arvioitiin minimipaksuudeksi ja suurempi maksimipaksuudeksi. Lähtökohtaisiksi jakavan kerroksen paksuuksiksi valittiin arvoja välillä 0 - 1500 mm kuormituksen ja pohjamaaluokan mukaan. Laskentojen perusteella muodostettiin kuvaajat, joissa jakavan kerroksen paksuus on esitetty kuormituskertojen funktiona. Minimi- ja maksimiarvojen välillä jakavan kerroksen paksuudelle ja sallittujen kuormituskertojen määrälle oletettiin lineaarinen yhteys. Jakavan kerroksen mitoituskuvaajat eri rakennevaihtoehdoille ja eri kuormituksille on esitetty kuvassa 32. Laskettujen arvojen lisäksi määritettiin vielä jakavan kerroksen mitoitusaulukot suuremmilla kuormitusmäärillä 10 miljoonaa kuormituskertaa asti kaikille kolmelle mitoitusajoneuvolle. Suurimmilla kuormituksilla ja kuormitusmäärillä mitoitusarvot jouduttiin määrittämään ekstrapoloimalla laskennallisista tuloksista.

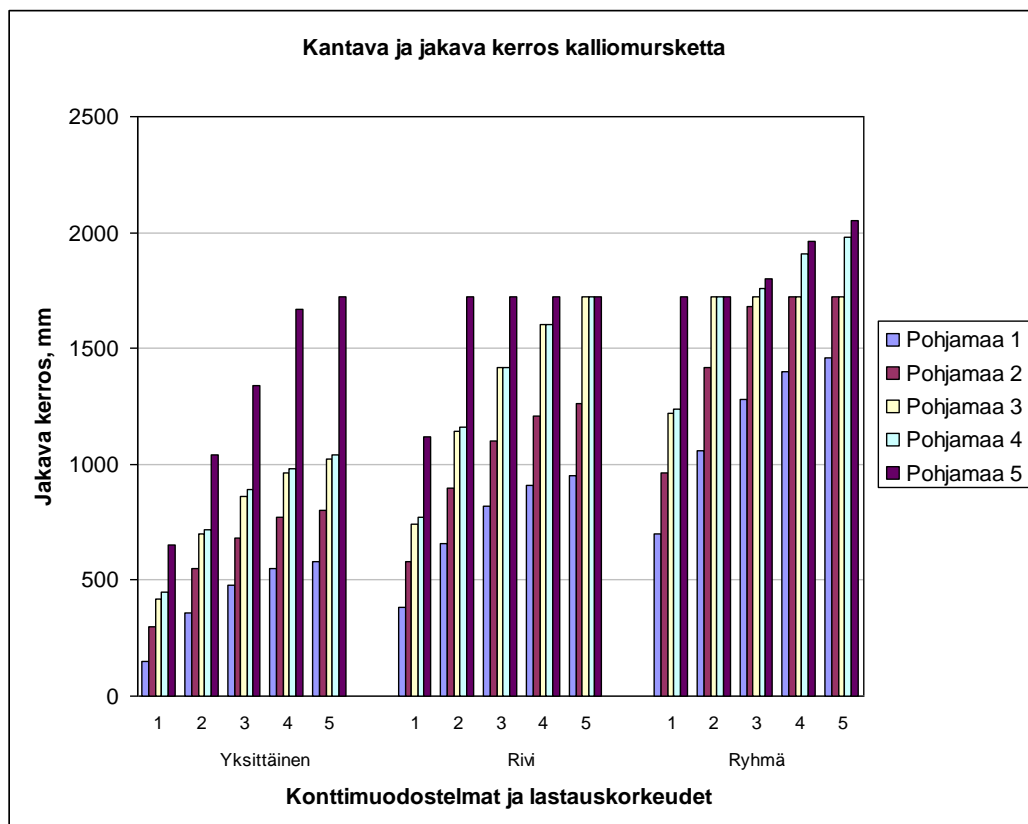


Kuva 32. Jakavan kerroksen mitoituskuvaajat raskaille pyöräkuormille (Silfwerbrand, 2005).

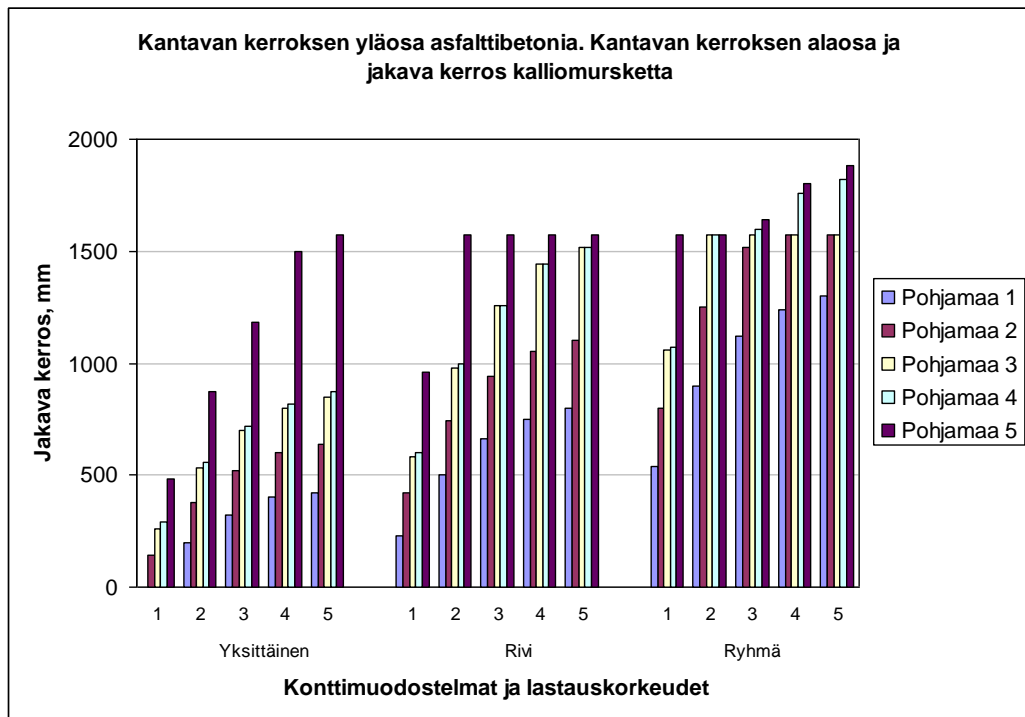
#### 4.3.4. Mitoitus konttikuormille

Konttikuormituksen mitoituskriteerinä käytettiin Vägverketin (2005b) yhdelle kuormituskerralle sallimaa 2400  $\mu$ s pystysuuntaista puristusmuodonmuutosta pohjamaan pinnalla. Laskentojen perusteella saatiin rakennekerrosten mitoitusaulukot kolmelle eri konttimuodostelmalle, joissa konttipinon korkeus oli suurimmillaan 5 konttia. Taulukoissa on esitetty vaadittu jakavan kerroksen paksuus eri konttimuodostelmilla ja pohjamaatyypeillä. Taulukoiden perusteella tehdyt diagrammit on esitetty kuvissa 33 - 35. Laskennoissa huomattiin, että jakavan kerroksen laskennallinen maksimipaksuus on monissa vaihtoehdoissa noin 1720 mm. Tällä jakavan kerroksen paksuudella kokonaisrakennepaksuus vastaa 2,0 m routasyvyyttä, jossa laskennassa käytettävät materiaaaliparametrit muuttuvat. Lisäksi huomattiin, että heikoimmalla pohjamaaluokalla vaadittu jakavan kerroksen paksuusvaatimus kasvaa nopeasti kuormituksen kasvaessa. Kokonaisrakennepaksuuden saavuttaessa routasyvyyden kasvu lakkaa lähes kokonaan. Maksimikuormitus oli 914,4 kN kappaleessa 4.2.3 esitetyn taulukon 7 mukaisesti.

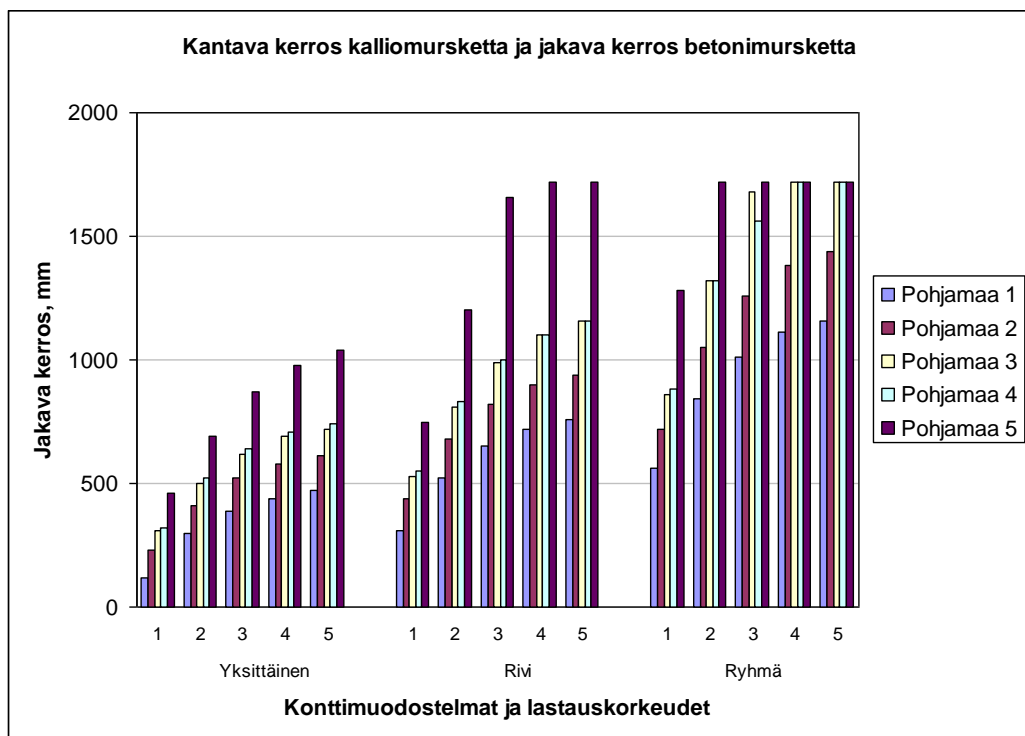
Vaihtoehtoisena mitoituskriteerinä konttikuormitukselle käytettiin myös 2,0 mm kokonaisdeformaatiota. GIPI -laskentaohjelmalla tehdyt kokonaisdeformaatioon perustuvat mitoituslaskennat johtivat kuitenkin huomattavan paksuun jakavaan kerrokseen jo yhden kontin kuormalla. Lasketut kokonaisdeformaatiot mitoitusohjeen rakenteilla olivat suurimmillaan noin 18 mm.



Kuva 33. Jakavan kerroksen paksuudet konttikuormille. Kantava ja jakava kerros kalliomursketta (Silfwerbrand, 2005).



Kuva 34. Jakavan kerroksen paksuudet konttikuormille. Kantavan kerroksen yläosa asfalttibetonia ja alaosa sekä jakava kerros kalliomursketta (Silfwerbrand, 2005).



Kuva 35. Jakavan kerroksen paksuudet konttikuormille. Kantava kerros kalliomursketta ja jakava kerros betonimursketta (Silfwerbrand, 2005).



## 4.4. HIPAVE - Australia

Heavy Duty Industrial Pavement Design eli HIPAVE (Wardle, 2005. Wardle ym., 2007) on australialaisen MINCAD Systemsin kehittämä tietokoneohjelma raskaille pyöräkuormille. Ohjelma on tierakenteiden mitoituksessa käytetyn CIRCLY-ohjelman jatkokehityksen tulos, ja sen kehityksessä on hyödynnetty myös lentokenttien rakennekerrosten mitoituksessa käytetyn APSDS-ohjelman käytöstä saatuja kokemuksia. Ensimmäinen kokeiluversio julkaistiin vuonna 2004 ja varsinainen versio vuonna 2005.

### 4.4.1. Mitoituskuormat

HIPAVE:ssa voidaan samanaikaisesti käyttää useampaa eri mitoituskuormaa, joille ohjelma laskee sekä yksittäiset että yhdistetyt muodonmuutokset. Ohjelmaan on valmiiksi syötetty erityyppisten työkonoiden kuormitustietoja eri konevalmistajilta. Kuormitustietoja voi muokata ja ohjelmaan voi luoda myös uusia kuormitusmalleja. Mitoituskuormien laskennassa käytetään lähtökohtaisesti Interpaven (2007) ohjeen mukaisia konttien painojakaumia, mutta myös omien jakaumien käyttö on mahdollista. Erillistä konttikuormien mitoitusmahdollisuutta ei kuitenkaan ole. Toisin kuin lentokentille tarkoitettussa APSDS-ohjelmassa HIPAVE:ssa sivuttaissuuntaisen liikkeen määrä voidaan määrittää erikseen kullekin ajoneuvolle.

### 4.4.2. Mitoituskriteerit

Standardiakselikuormituksen tai standardipyöräkuormituksen sijasta mitoitus perustuu suoraan koko kuormituskokonaisuuteen, jolle lasketaan kumulatiivinen vauriokerroin (cumulative damage factor, CDF). Kumulatiivinen vauriokerroin määritetään erikseen pohjamaalle ja päällysteelle Minerin lain mukaisella kaavalla

$$CDF = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (4.13)$$

jossa

CDF on kumulatiivinen vauriokerroin (-)

$n_i$  tiettyä kuormitustyyppiä vastaava kuormitusmäärä (kpl)

$N_i$  tietylle kuormitustyyppille sallittava kuormitusmäärä (kpl).

Kumulatiivisten vauriokertoimien laskennassa käytetään perinteisiä tierakenteiden mitoituksessa käytettyjä vauriokriteerejä sidotun kerroksen alapinnan vetomuodonmuutokselle ja pohjamaan yläpinnan puristusmuodonmuutokselle kaavalla

$$N = \left[ \frac{k}{\varepsilon} \right]^b \quad (4.14)$$

jossa

- N on sallittu kuormitusmäärä (kpl)
- $\varepsilon$  muodonmuutos sidotun kerroksen alapinnassa tai pohjamaan yläpinnassa ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )
- k ja b pohjamaan tai päällysteen materiaalin kuormituskestävyydestä riippuvia kertoimia (-).

Ohjelmassa on valmiita väsymismalleja eri päällystemateriaaleille, mutta myös omien rakennemateriaalien ja väsymissuorien käyttö on mahdollista. Kuvassa 36 on esitetty ohjelman valmiita päällystemateriaaleja ja niiden kertoimet k ja b.

| Elastic Materials Performance Costs Material Types |                           |                              |          |                                    |              |  |
|--|---------------------------|------------------------------|----------|------------------------------------|--------------|--|
| Asphalt (new)                                      |                           |                              |          | Damage Relationship Type: Standard |              |  |
| ID   | Title                     | Component                    | Location | Constant (k)                       | Exponent (b) |  |
| Asph2000   | Asphalt, E=2000, vb=10    | Max. Horizontal Tensile Str. | Bottom   | 0,004322                           | 5,00         |  |
| Asph2800   | Asphalt- 2800 MPa, VB=11% | Max. Horizontal Tensile Str. | Bottom   | 0,004169                           | 5,00         |  |
| Asph3000   | Asphalt- 3000 MPa, VB=11% | Max. Horizontal Tensile Str. | Bottom   | 0,004067                           | 5,00         |  |

Kuva 36. HIPAVE:n lähtökohtaiset päällystemateriaalit (Mincad Systems, 2010).

HIPAVE:ssa käytetään APSDS-ohjelman jatkokehitysvaiheessa määritettyjä laskentakaavoja pohjamaan kertoimille k ja b. Laskentakaavat on määritetty APSDS-laskennoilla pohjamaan CBR-arvoilla 3 - 15 % lentokoneille massoiltaan 40 - 397 t. Laskentatulokset on kalibroitu U.S. Army Corps of Engineersin 1970-luvulla tekemien laajojen kuormituskokeiden tuloksiin. Kertoimet k ja b määritetään pohjamaan jäykkyysmoduulin perusteella kaavoilla

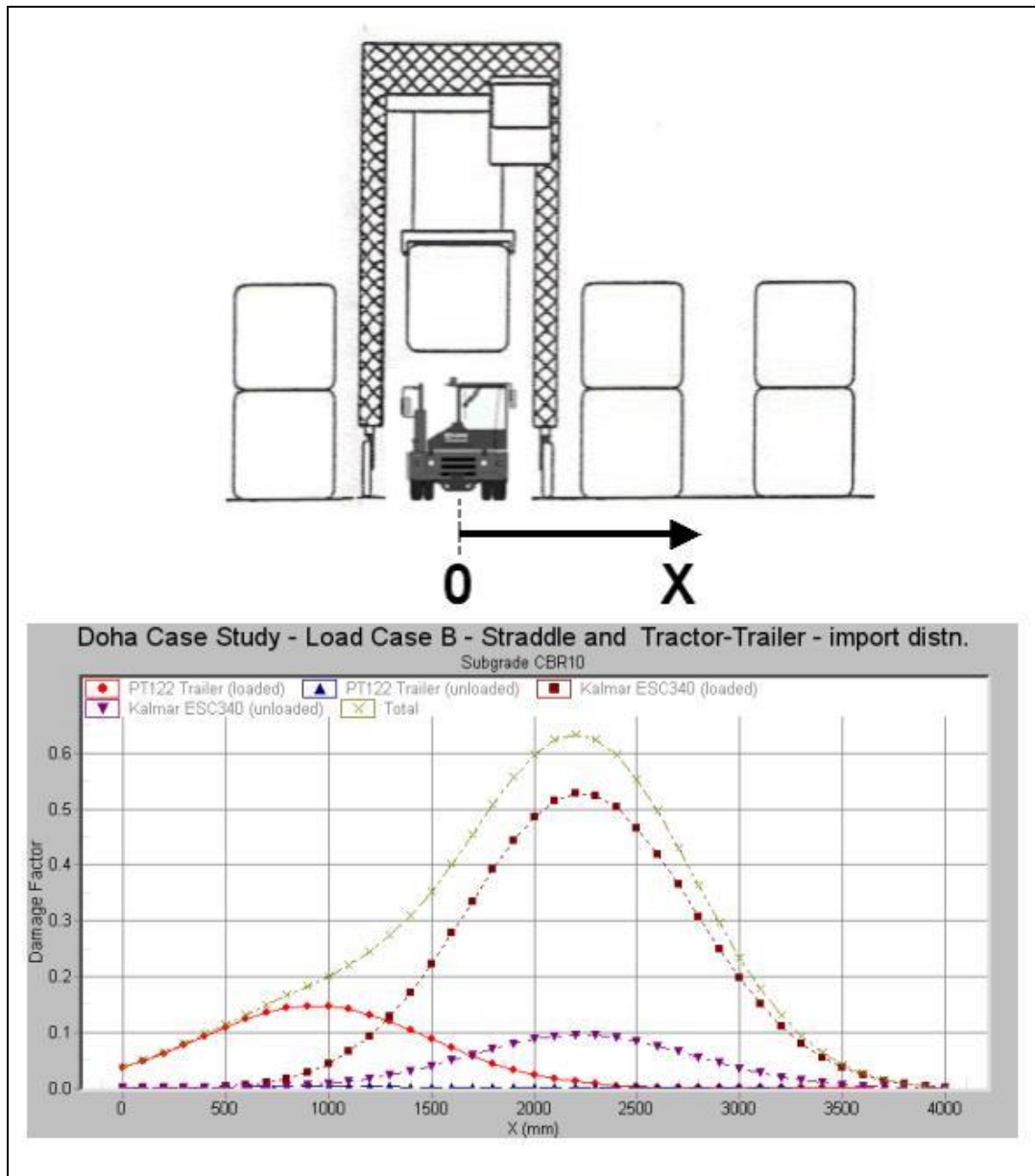
$$k = 1,64 \times 10^{-9} \times M_r^3 - 4,31 \times 10^{-7} \times M_r^2 + 2,18 \times 10^{-5} \times M_r + 0,00289 \quad (4.15)$$

$$b = -2,12 \times 10^{-7} \times M_r^3 + 8,38 \times 10^{-4} \times M_r^2 - 0,0274 \times M_r + 9,57 \quad (4.16)$$

joissa

- $M_r$  on pohjamaan jäykkyysmoduuli (MPa)
- k ja b jäykkyysmoduulista riippuvia kertoimia (-).

Kuvassa 37 on esitetty HIPAVE:n laskema pohjamaan vauriokertoimen jakauma, kun kuormitus koostuu kuvan mukaisesta lukkitrukin ja terminaalitraktorin yhteiskuormituksesta. Pystyakselilla on kuvattu vauriokerroin ja vaaka-akselilla etäisyys ajoneuvojen keskikohdasta. Kuvassa esitetyt kuvaajat esittävät tyhjän terminaalitraktorin (sininen), lastatun terminaalitraktorin (punainen), tyhjän lukkitrukin (violetti) ja lastatun lukkitrukin (ruskea) aiheuttamia vauriokertoimia. Ylin (vihreä) kuvaaja on kaikkien kuormitustyyppien yhdistetty vauriokerroin. Kuvasta voidaan havaita, että tyhjän terminaalitraktorin kuorma ei aiheuta laskennassa huomioon otettavaa vauriota. Tällä tavalla voidaan vähentää mahdollista päällekkäisistä kuormituksista ja kulkuneuvojen sivuttaisliikkeistä johtuvaa yli- tai alimitoitusta.



Kuva 37. Lukkitrukin ja terminaalitruktorin aiheuttamat pohjamaan vauriokertoimen jakaumat poikkisuunnassa (Wardle ym., 2007).

## 4.5. Vuosaaren sataman mitoitus

### 4.5.1. Mitoituskuormat

Mitoitusta (Helsingin satama, 2005) varten satama jaettiin liitteessä C.2 esitetyn yleissuunnitelman perusteella liikennealueisiin ja kenttäalueisiin. Liikennealueilla liikenteen aiheuttama kuormitus on pääasiassa suurempaa kuin kenttäalueilla, joilla kuormitus on pääasiassa staattista kuormitusta. Kenttäalueiden rakennekerrosten mitoitusta perustui kuitenkin niillä liikennöivien ajoneuvojen ja työkoneneiden kuormitukseen. Staattisia konttikuormia ei lopulta otettu mitoituksessa tarkemmin huomioon. Mitoitusta ja sen lähtötietojen arviointia hankaloittivat sataman yleissuunnitelman muuttuminen suunnitteluprosessin edetessä sekä sataman tulevan liikennemäärän vaikea ennustettavuus.

Rekkaliikennettä varten mitoituksessa käytettiin tierakenteiden mitoituksessa käytettyä menetelmää ja tuloteiden raskaan liikenteen jakaumana silloisen Tiehallinnon jakaumaa raskaalle liikenteelle. Keskimääräinen raskaan ajoneuvon vastaavuuskerroin on 2,2. Henkilöautoliikennettä ei otettu ollenkaan huomioon rakennekerrosten mitoituksessa. Satamassa käytettäville raskaille työkoneille ei sen sijaan ollut aiemmin määritetty vastaavuuskertoimia. Yleisesti käytössä olevan neljännen potenssin säännön ei katsottu soveltuvan satamakoneiden selvästi tieliikenteestä poikkeavalle kuormitukselle. Vastaavuuskertoimet päätettiin lopulta määrittää tapauskohtaisesti käyttäen hyväksi APAS -monikerroslaskentaohjelmalla laskettuja muodonmuutoksia kullekin työkoneelle. Laskennassa käytetyt akseleiden mitat määräytyivät satamassa käyttöön otettavien työkoneiden mittojen mukaan ja mitoituskuormat muista satamista saatujen tilastojen perusteella. Mitoituksessa käytettyjen neljän työkoneen kuvat ja tiedot on esitetty liitteessä C.1. Vastaavuuskertoimien laskentaa varten APAS:iin määritettiin taulukossa 14 esitetty tulevia rakennekerroksia keskimääräisesti parhaiten kuvaava rakennemalli eli yksinkertaistettu perinteinen rakenne.

Taulukko 14. Yksinkertaistettu perinteinen rakenne (Helsingin Satama, 2005)

| Rakennekerros     | Kerrospaksuus<br>[mm] | Jäykkyysmoduuli<br>[MPa] |
|-------------------|-----------------------|--------------------------|
| AB 50/70          | 100-300               | 2245                     |
| Kalliomurske M280 | 300                   | Jännitystilariippuva     |
| Kalliomurske M200 | 300                   | Jännitystilariippuva     |
| Hiekka            | 500                   | 35                       |

Laskentalämpötilana oli 18 °C ja kuormitusliikenteen nopeutena ajoneuvosta riippumatta 10 km/h. Päällysteen alapinnan vetomuodonmuutos ja pohjamaan yläpinnan pystysuuntainen kokoonpuristuma määritettiin jokaiselle akselille erikseen viidellä eri päällystepaksuudella. Kriittisiä muodonmuutoksia verrattiin standardiakselille laskettuihin muodonmuutoksiin, jolloin jokaiselle akselille saatiin vertailukerroin vetomuodonmuutoksien ja kokoonpuristumien perusteella laskettujen kertoimien keskiarvon perusteella. Ajoneuvon vastaavuuskerroin saatiin laskemalla akseleiden vertailukertoimet yhteen. Vastaavuuskertoimet on esitetty taulukossa 15. Mitoituksessa käytettyjen Excel-tilukoiden mukaan kaikille ajoneuvoille käytetty dynaaminen kuormituslisä oli 1,15.

Taulukko 15. Satama-ajoneuvojen vastaavuuskertoimet (Helsingin Satama, 2005)

| Ajoneuvo              | Tyhjänä | Kontin kanssa | Täyden kontin kanssa |
|-----------------------|---------|---------------|----------------------|
| Lukkitrulli           | 6,2     | 6,6           | 8,5                  |
| Terminaalitraktori    | 1,2     | 2,2           | 4,6                  |
| Konttikurttaja        | 7,1     | 7,5           | 8,7                  |
| Vastapainotrulli      | 5,0     | 5,4           | 6,7                  |
|                       | Tyhjänä | Perävaunu     | Täysi kuorma         |
| Puoliperävaunu (KAPP) | 0,4     | 0,9           | 3,0                  |

#### **4.5.2. Rakennekerrosratkaisut ja rakennekerrosmateriaalit**

Liitteenä C.3 olevan perustamistapakartan perusteella suurin osa sataman kontti- ja trailerialueista rakennettiin merihiekkatäytön päälle. Varsinaisella satama-alueella on lisäksi irtilouhitun kallion sekä louhe- ja moreenitäyttöjen varaan perustettuja alueita. Sataman pohjoispuolella olevat tulo- ja poistumisväylät sekä yritysalueet on perustettu suurimmaksi osaksi kalkkipilaristabiloidulle pohjamaalle. Sataman rakennustöiden alettua alueelta löydettiin myös tributyylinalla (TBT) pilaantunutta maata, josta vähiten pilaantunut osa pystyttiin käyttämään suoraan täyttömaana ja vaikeimmin pilaantunut osa massastabiloituna kerroksena.

Merihiekkatäyttöjen pinta nostettiin noin 0,6 m etäisyydelle päällysteen pinnasta. Merihiekkakerroksen katsottiin vastaavan suodatinkerrosta ja tarvittaessa merihiekkakerros lisättiin vielä moreenitäytön päälle erilliseksi suodatinkerrokseksi. Merihiekan jäykkyysmoduuliksi määritettiin 50 MPa rakentamisen aikana suoritettujen pudotuspaino- ja levykuormitusmittausten perusteella. Kantavan ja jakavan kerroksen materiaalit saatiin sataman läheisestä Miljoonamäestä louhitusta kiviaineksesta. Murskatun kiviaineksen jäykkyysmoduuliksi määritettiin 350 MPa, joka on huomattavasti suurempi kuin tierakenteiden mitoitusohjeissa (Tiehallinto, 2004) käytetty maksimiarvo 280 MPa. Mursketta pidettiin kuitenkin varmuudella hyvälaatuisena ja karkearakeisempina kuin perinteisiä tierakenteissa käytettyjä murskeita. Hyvin deformaatiota kestävä karkearakeinen murske pyrittiin tuomaan mahdollisimman ylös rakennekerroksissa.

Murskatulle kiviainekselle tehtyjen kokeiden perusteella samaa kiviainesta päätettiin käyttää myös päällysteen kiviaineksena. Kulutuskerroksessa voidaan satama-alueilla käyttää deformaatiokestävää suurempaa maksimiraekokoa, koska pinnan tasaisuudelle ja meluttomuudelle ei jouduta asettamaan samoja vaatimuksia kuin tieympäristössä. Deformaatiokestävyys oli keskeisessä osassa myös kiviaineksen rakeisuutta valittaessa. Päällystekerrosten suunnittelussa sovellettiin lähtökohtaisesti käänteistä rakennetta, jossa kulutuskerroksen alla on deformaatiokestävä jäykkä päällystekerros ja alimmaisena pehmeämpi ja hyvin muodonmuutoksia kestävä päällystekerros. Kulutuskerroksen massa oli alkuperäisissä suunnitelmissa pääasiassa AB20 B50/70, keskimmäisen kerroksen ABK32 B20/30 ja alimman kerroksen ABK32 B50/70. Toisaalta lopullisissa suunnitelmissa kaikkia kolmea päällystekerrosta käytettiin vain erittäin raskaasti kuormitetuilla alueilla. Keskimmäisen kerroksen sideaineena käytettiin lopulta 50/70-bitumia, johon lisättiin gilsoniittia.

#### **4.5.3. Mitoituslaskennat ja lopulliset rakenteet**

Mitoituslaskennat tehtiin pääasiassa APAS -monikerroslaskentaohjelmalla ja mitoitusaikana oli 10 vuotta. Irtilouhitun kallion ja louhetäyttöjen varaan perustetut alueet mitoitettiin Odemarkin kantavuusyhtälöllä, koska kallion läheisyyden on todettu johtavan APAS -mitoituksessa päällystekerroksen ylimitoitukseen. Odemarkin yhtälöä käytettiin myös kaikkien rakennevaihtoehtojen kantavuuden tarkistamiseen. Rakennemitoituksen yhteydessä suoritettiin lisäksi rakennekerrosten pysyvien muodonmuutosten tarkastelu VTT:n

kehittämällä deformaatiotyökalulla, jolla voitiin vertailla kahden rakennekerrosvaihtoehdon kykyä vastustaa deformaatiota.

Ensimmäisten APAS -laskentojen tuloksena saatiin 16 erilaista rakennekerrostyyppiä, joita päätettiin yhdistää kuormituskertaluvun ja sijainnin perusteella. Lopulta päädyttiin viiteen eri kuormituskertalukuryhmään, jotka on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16. Kuormituskertalukuryhmät (Helsingin Satama, 2005).

| Ryhmä                    | 1      | 2           | 3          | 4        | 5      |
|--------------------------|--------|-------------|------------|----------|--------|
| Kuormituskertaluku       | 3000 - | 1200 - 3000 | 400 - 1200 | 50 - 400 | 0 - 50 |
| Laskennassa käytetty kkl | 3800   | 2500        | 900        | 300      | 45     |

Rakennekerrosvaihtoehdot nimettiin numero-kirjain -yhdistelmänä kuormituskertaluvun (1-5) ja alusrakenneluokan (N ja J) perusteella. Jokaiselle ryhmälle mitoitettiin rakennekerrokset alusrakenneluokalla N (kantavuus 50 MPa) käyttäen APAS -monikerroslaskentaohjelmaa. Mitoituksessa sallittiin 60 mm routanousu, joten rakennepaksuudeksi määritettiin jokaiselle vaihtoehdolle 1200 mm. Routaan ei kuitenkaan arvioitu aiheuttavan ongelmia, koska täytöissä käytetty merihiekka oli todettu ennakkokokeiden perusteella pääosin routimattomaksi. Alusrakenneluokalla J (kantavuus 280 MPa) eli irtilouhitun kallion ja louhetäyttöjen varaan perustetuilla alueilla mitoitus perustui Odemarkin menetelmällä laskettuun kantavuuteen. Rakennekerrosten kokonaispaksuudeksi määritettiin 300 mm, josta sidottujen kerrosten paksuus iteroitiin 150 mm:stä ohuempaan kerrokseen edeten. Odemarkin kantavuusyhtälöä käytettiin lisäksi APAS:illa mitoitettujen rakennekerrosten kantavuuden laskennalliseen määrittämiseen. Alkuperäiset mitoitettut rakenteet on esitetty liitteessä C.4. Suunnitteluvaiheessa raskaan staattisen kuormituksen alaisia alueita, kuten porttialueet ja trailerikenttien tukijalkojen paikat, ehdotettiin päällystettäväksi deformaatiokestävällä komposiittiasfaltilla. Näiden alueiden päällystesuunnittelu jätettiin tarkennettavaksi sataman rakennussuunnittelun edetessä.

Lopulliset rakennekerrokset poikkesivat jonkin verran suunnitteluraportin mukaisista rakenteista. Kuormituskertalukuryhmän 1 mukaisia rakennekerroksia ei ollut lopullisissa suunnitelmissa ollenkaan eikä niitä myöskään rakennettu. Sen sijaan komposiittiasfalttia käytettiin sataman raskaasti liikennöidyillä tulo- ja poistumisväylillä, joilla liikenne on hidasta ja kanavoitunutta. Konttien ja trailereiden tukijalkojen paikkoja ei kuitenkaan päällystetty komposiittiasfaltilla. Satamaan rakennettiin lisäksi koerakenne, jossa käytettiin sementillä, masuunikuonalla, lentotuhkalla ja rikinpoiston lopputuotteella stabiloitua kalliomursketta kantavana kerroksena (Helsingin Satama, 2007). Lopulliset perusrakenteet 2J-5J, 2J-2N ja komposiittiasfalttirakenne sekä niiden sijoittuminen sataman alueella on esitetty suunnitelmakuvassa liitteessä C.5. Kuvassa on esitetty myös rakentamisaikaiset rakennekerrokset sekä välittömästi rakentamisen jälkeen vaadittu kantavuusvaatimus kantavan kerroksen päältä ja rakenteen lopullinen laskennallinen kantavuus. Raportissa ei ole selvitetty, millä perusteella kantavan kerroksen kantavuusvaatimus asetettiin. Koerakenteen rakennekerrokset ja niiden sijoittuminen on esitetty liitteessä C.6.

## 4.6. Yhteenvedo mitoitusmenetelmistä

Taulukossa 17 on esitetty yhteenvedo käsitellyistä mitoitusmenetelmistä.

Taulukko 17. Yhteenvedo mitoitusmenetelmistä

|                              | <b>Asphalt<br/>Institute</b><br>Yhdysvallat  | <b>Interpave</b><br>Englanti   | <b>CBI</b><br>Ruotsi  | <b>HIPAVE</b><br>Australia  | <b>Vuosaari</b><br>Suomi                                  |
|------------------------------|--|--|---|---|---|
| <b>Julkaisuvuosi:</b>        |  |  |   |   |   |
| Ensimmäinen                  | 1986   | 1984   | 2005  | 2005  | 2005  |
| Uusin                        | 2006   | 2007   | -   | 2010  | -   |
| <b>Käsiteltävät kuormat:</b> |  |  |   |   |   |
| Raskaat<br>pyöräkuormat      | Kyllä  | Kyllä  | Kyllä   | Kyllä   | Kyllä   |
| Konttikuormat                | Ei   | Kyllä  | Kyllä   | Ei  | Ei  |
| <b>Rakennemateriaalit:</b>   |  |  |   |   |   |
| Päällyste                    | Syväasfaltti   | Betonikivi   | Betonikivi  | Asfaltti  | Asfaltti  |
| Kantava<br>kerros            | Syväasfaltti   | Maabetoni  | ABK tai<br>kalliomurske   | Murske,<br>ABK tai<br>sementti-<br>stabilointi  | ABK,<br>kalliomurske<br>tai stabiloitu<br>kerros          |
| Jakava<br>kerros             | -  | Kalliomurske   | Kallio- tai<br>betonimurske   | Useita  | Merihiekka  |
| Pohjamaan<br>luokitus        | Jäykkyys-<br>moduuli   | CBR-arvo   | Jäykkyys-<br>moduuli  | CBR-arvo  | Jäykkyys-<br>moduuli                                      |
| <b>Mitoitettava kerros:</b>  |  |  |   |   |   |
|                              | Päällyste  | Kantava<br>kerros,<br>tukikerros   | Jakava<br>kerros  | Useita  | Useita  |
| <b>Mitoituslaskennat:</b>    |  |  |   |   |   |
| Laskentatapa                 | Monikerros-<br>laskenta  | Elementti-<br>menetelmä  | Monikerros-<br>laskenta   | Monikerros-<br>laskenta   | Monikerros-<br>laskenta ja<br>Odemark                     |
| Ohjelma                      | SW-1   | Sigma/w  | BISAR 3.0   | HIPAVE 5.0  | APAS 3.0  |
| <b>Mitoituskriteerit:</b>    |  |  |   |   |   |
| Sidotut kerrokset            | -  | Maabetonin<br>veto   | Kantavan<br>kerroksen<br>asfalttibetonin<br>veto  | Sidotun<br>kerroksen<br>veto  | Sidotun<br>kerroksen veto.<br>Kallioalueilla<br>kantavuus |
| Pohjamaa                     | Puristus   | CBR-arvo   | Puristus  | Puristus  | Puristus  |
| <b>Saatavuus:</b>            |  |  |   |   |   |
|                              | Mitoitusohje<br>ostettavissa<br>hintaan 45 \$<br><br>SW-1 -<br>ohjelman 30-<br>päivän<br>kokeiluversio<br>ilmainen.<br>Täysversio<br>ostettavissa<br>hintaan<br>400 \$ | Mitoitusohje<br>ladattavissa<br>ilmaiseksi<br>Interpaven<br>kotisivuilta | Mitoitustaulukot<br>teoksessa<br>”Dimensionering<br>av markstens-<br>överbyggnader<br>för industrier” | Kokeiluversio<br>ladattavissa<br>Mincad<br>Systemsin<br>kotisivuilta<br><br>Kokoverion<br>vuosilisenssi<br>2600 €<br>sisältäen<br>tuotetuen ja<br>päivitykset | -   |

## **5. RAKENNETTUIJEN KENTTIEN KOKEELLINEN TUTKIMUS – AINEISTO JA MENETELMÄT**

### **5.1. Tutkimusmenetelmät**

Kokeellinen tutkimus jakautui kenttätutkimuksiin ja laboratoriotutkimuksiin. Kenttämittauksissa määritettiin kokonaiskantavuudet, alusrakenteen kantavuudet, taipumasuppilot ja rakennekerrospaksuudet, joiden perusteella laskettiin rakennekerrosten jäykkyysmoduulit. Laboratoriossa määritettiin koekohteista porattujen koekappaleiden tyhjätilat, jäykkyysmoduulit sekä deformaatio-ominaisuudet. Valituista koekappaleista määritettiin myös sideaineiden jäykkyydet sekä päällystekiviaineen rakeisuudet, joiden perusteella pystyttiin laskemaan asfalttimassojen dynaamiset moduulit Witczakin ennustemallilla. Eri tavoilla määritettyjä moduuleja vertaillaan myöhemmin kappaleessa 8.

Molemmat tutkimukset suoritettiin kesän 2010 aikana. Kenttätutkimuksissa käytettiin kahta erilaista pudotuspainolaitetta, maatulkaa, Helsingin kaupungin katulaboratorion päällysteporaa sekä Helsingin ja Vantaan kaupunkien geotekniikkayksiköiden kairauskalustoja. Laboratoriotutkimukset tehtiin Aalto-yliopiston liikenne- ja tietekniikan tutkimusryhmän laboratoriossa.

### **5.2. Laboratoriokokeet; koemenettelyt**

#### **5.2.1. Koekappaleiden mitat, massat ja tiheydet sekä päällystekiviaineen rakeisuus**

Päällysteporanäytteet porattiin 15.6.2010 kolmesta koekohteesta kuvassa 38 esitetyllä Helsingin katulaboratorio Staran 150 mm:n päällysteporalla. Laboratoriokokeita varten näytteistä sahattiin sopivat koekappaleet Destia Oy:n Maantiekylän asfalttiasemalla. Koekappaleet kuvattiin ja niiden päällystekerrosrajat merkittiin ylös. Useissa koekappaleissa oli kaksi asfalttikerrosta, jotka saattoivat olla erilaista päällystemassaa. Koekappaleiden halkaisijat mitattiin kolmesta kohdasta työntömittaa käyttäen, ja tulosten keskiarvo merkittiin koekappaleen halkaisijaksi. Koekappaleiden korkeudet mitattiin työntömitalla neljästä kohdasta, ja tulosten keskiarvo merkittiin koekappaleen korkeudeksi.



Kuva 38. Käytetty päällystepora.



Mittauksissa ilmeni, että Sompasaaresta vielä myöhemmin poratut viisi näytettä oli porattu eri poranterällä. Näiden koekappaleiden halkaisijat olivat keskimäärin vain 145 mm, mutta koekappaleista kaksi oli joka tapauksessa päätetty hylätä reunojen lohkeamisen takia. Jäljelle jääneet kolme näytettä eivät halkaisijansa perusteella sopineet standardinmukaiseen jäykkyyskokeeseen, mutta ne sopivat kuitenkin jaksolliseen virumiskokeeseen. Lisäksi yksi Tikkurilan näyte hylättiin halkaisijan liian suuren vaihtelun vuoksi. Näiden toimenpiteiden jälkeen koekappaleita saatiin yhteensä 24.

Ennen jäykkyyskokeita ja jaksollisia virumiskokeita koekappaleet punnittiin ilmassa ja vedessä. Punnitustuloksista laskettiin päällysteen tiheydet. Jäykkyyskokeiden ja jaksollisten virumiskokeiden jälkeen asfalttimassan maksimitiheys määritettiin standardin SFS-EN 12697-5 (SFS, 2003) mukaisesti hydrostaattisella menetelmällä. Määritetyistä tiheyksistä voitiin tämän jälkeen laskea koekappaleiden tyhjätila. Punnitusten jälkeen viiden koekappaleen asfalttimassalle tehtiin uuttosuodatus, jossa päällysteen sideaine erotettiin kiviaineksesta. Jätkäsaaresta ja Sompasaaresta otettiin kummastakin yksi näyte ja Tikkurilan linja-autotermiinalista kolme näytettä. Kiviaineksen rakeisuuskäyrä määritettiin kuivaseulonnalla. Uuttosuodatuksesta talteen otettu hienoaines lisättiin seulonnan jälkeen seulojen pohjalle jääneeseen kiviainekseen, joten erillistä pesuseulontaa ei kiviainekselle tehty.

### 5.2.2. Tunkeumakoe ja pehmenemispisteen määrittäminen

Sideaineen tunkeuma määritettiin standardin EN 1426 (CEN, 2007a) mukaisesti ja pehmenemispiste rengas-kuula -menetelmällä standardin EN 1427 (CEN, 2007b) mukaisesti. Tunkeumakokeessa käytetty laitteisto on esitetty kuvassa 39 ja pehmenemispisteen määrittämiseen käytetty laitteisto kuvassa 40.



Kuva 39 vasemmalla. Tunkeuman määrittämiseen käytetty laitteisto.



Kuva 40 oikealla. Pehmenemispisteen määrittämiseen käytetty laitteisto.

### 5.2.3. Epäsuora vetokoe

Koekappaleiden jäykkyyssmoduulit testattiin standardin SFS-EN 12697-26 (SFS, 2004) mukaisesti epäsuoralla vetokokeella kahdessa eri lämpötilassa. Testaus suoritettiin Aalto-yliopiston liikenne- ja tietekniikan tutkimusryhmän servo-hydraulisella UTM 25 -laitteella (Universal Testing Machine) heinäkuussa 2010. Laitteen toiminta perustuu 25 kN voimaanturiin, jota ohjataan IMACS -ohjainlaitteen ja tietokoneen avulla. Kuormituksena käytettiin puolisinin muotoista kuormituspulssia, jonka suuruus säädettiin lähtökohtana 7  $\mu\text{m}$  vaakasuora muodonmuutoshuippu. Muodonmuutokset mitattiin koekappaleiden molemmilta sivuilta erilliseen kehikkoon asennetuilla siirtymäantureilla. Yksityiskohtaisempi testiraportti on liitteenä E.

Kuvassa 41 vasemmalla on koekappaleiden lämpötilan tarkkailuun käytetty valenäyte ja oikealla koekappale koestustelineessä. Valenäytteessä on lämpötila-anturit asennettuina sen ulkopintaan sekä sisälle. Mittauskehikko, johon siirtymäanturit on asennettu molemmiin puolin, on puristettu muovitapeilla kiinni koekappaleeseen sen vaakasuoran halkaisijan kohdalle. Koekappale asetettiin kahden kuormituspalkin väliin, joista ylintä palkkia kuormitettiin kuvassa ylhäällä näkyvän terässylinterin kautta. Koestustelineen alaosassa on mittauskehikon keskittämiseen käytetty säädin, joka laskettiin alas mittauskehikon kiinnittämisen jälkeen.



Kuva 41. Epäsuoran vetokokeen testijärjestely.

#### 5.2.4. Jaksollinen virumiskoe

Koekappaleiden deformaatio-ominaisuudet testattiin jaksollisella virumiskokeella standardin SFS-EN 12697-25 (SFS, 2005) mukaisesti. Testauksessa käytettiin testimenetelmää A eli yksiakselista sivutuellaista virumiskoetta, jossa sivutuki saadaan aikaan käyttämällä halkaisijaltaan pienempää kuormituslevyä. Näin kuormituslevyn ulkopuolelle jäävä osa koekappaleesta toimii sivutukena kuormituksen alaiselle osalle. Myös tässä testauksessa käytettiin Aalto-yliopiston UTM 25 -laitetta. Aluksi koekappaleita esikuormitettiin 10 min kuormituksella, joka aiheutti koekappaleeseen 10 kPa jännityksen. Varsinaisessa testissä kappaleita kuormitettiin 2 h jaksollisella kuormituksella, jonka taajuus oli 0,5 Hz ja jännitys kuormitushuipulla 100 kPa. Yksityiskohtaisempi testiraportti on liitteenä F.

Muodonmuutoksen mittaamiseen käytettiin kahta siirtymäanturia, jotka mittasivat kuormituslevyn akselinsuuntaista siirtymää testin aikana. Kuvassa 42 näkyvät valenäyte sekä koekappale koestusalustalla. Koekappaleen päällä on halkaisijaltaan 100 mm kuormituslevy, jota kuormitetaan UTM -laitteen kuormitussyinterillä. Kuormituslevyn alemmat reunat on viistetty siten, että varsinaisen puristusalueen halkaisija on 96 mm. Siirtymäanturit kiinnitettiin koestusalustan telineeseen ja nollattiin virumiskokeen alussa kuormituslevyn yläpintaan. Kuormituslevyn ja koekappaleen sekä kuormitusalustan ja koekappaleen väliin laitettiin silikonirasvalla voidellut kalvot, jotta kitka saatiin mahdollisimman vähäiseksi.

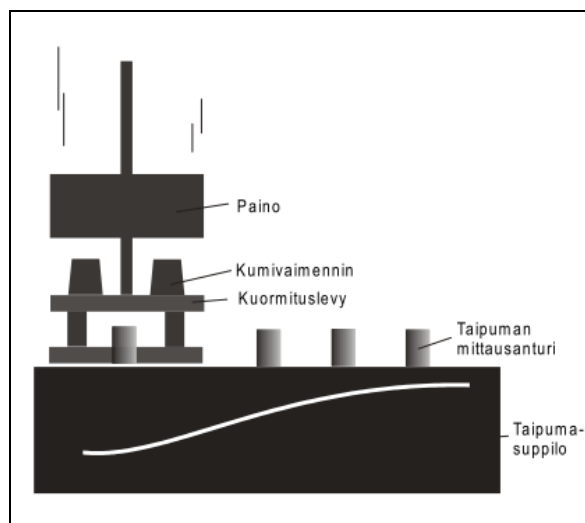


Kuva 42. Jaksollisen virumiskokeen testijärjestely.

## 5.3. Kenttäkokeet; koemenettelyt

### 5.3.1. Pudotuspainomittaus

Pudotuspainomittauksen tarkoituksena on kantavuuden sekä tien pinnan taipuman mittaaminen liikennekuormitusta simuloivan pudotuspainokuormituksen alaisena. Pudotuspainolaitteen yksinkertaistettu toimintaperiaate on esitetty kuvassa 43. VTT:n raportin (Spoof & Petäjä, 2000a) mukaan paino pudotetaan halkaisijaltaan yleensä 300 mm teräslevylle, jonka päällä on vaimennin. Kuormituskorkeutta ja painoa voidaan säätää, jolloin myös rakenteeseen kohdistettu kuormitus muuttuu. Yleisesti käytetty voima on 10 t akselipainoa vastaava 50 kN kuormitusvoima. Eri laitteilla kuormitusaika vaihtelee välillä 20 - 60 ms. Tien pinnan taipuma mitataan eri etäisyyksillä kuormituslevystä olevilla antureilla. Taipumat kuormituslevyn alla kuvaavat päällysteen jäykkyyttä ja kauempien antureiden taipumat vastaavasti rakennekerrosten ja pohjamaan jäykkyyksiä. Mitatut taipumat kuvataan taipumasuppilona, jonka muodon perusteella voidaan arvioida rakennekerrosten ominaisuuksia. Taipumasuppilon perusteella voidaan myös laskennallisesti määrittää eri kerrosten jäykkyyshuomiot, kun rakennekerrospaksuudet tunnetaan. Pudotuspainomittauksilla saadaan selvitettyä myös rakenteen kokonaiskantavuus sekä alusrakenteen kantavuus.



Kuva 43. Pudotuspainolaitteen toimintaperiaate (Spoof & Petäjä, 2000a).

Pudotuspainomittaukset tehtiin kaikissa koekohteissa kuvassa 44 esitetyllä AL-Engineering Oy:n Heavy Loadman FWD:llä, joka on tavalliseen peräkärriin asennettu pudotuspainolaite. Laitteen kuormituspulssin kesto on noin 25 - 30 ms (AL-Engineering Oy, 6.4.2011). Laitteella ei pystytty kuitenkaan mittamaan taipumasuppiloa. Tutkimuksen kolmessa pääkohteessa käytettiin lisäksi kuvassa 45 esitettyä Road Consulting Oy:n KUAB FWD 50 -laitteistoa. Laitteen kuormituspulssin kesto on noin 22 ms (Road Consulting Oy, 6.4.2011). Jokaisessa mittauspisteessä suoritettiin kolme pudotusta suurimmalta pudotuskorkeudelta, jolloin kuormitusvoimaksi saatiin 50 kN ja pintajännitykseksi 707 kPa. Taipumat mitattiin etäisyyksiltä 0, 200, 300, 450, 600, 900 ja 1200 mm kuormituslevystä, jonka halkaisija on 300 mm.





Kuva 44 vasemmalla. Heavy Loadman FWD -pudotuspainolaite.



Kuva 45 oikealla. KUAB FWD 50 -pudotuspainolaite.

Jokaisen mittauksen kohdalla mitattiin myös ulkoilman ja päällysteen pinnan lämpötilat. Päällysteen pinnan lämpötilan perusteella laskettiin päällysteen keskimääräinen lämpötila, kun poranäytepisteistä määritetyt päällystepaksuudet olivat etukäteen tiedossa. Päällysteen lämpötilan perusteella laskettiin korjauskertoimet etäisyyksiltä 0 - 600 mm kuormituslevystä mitatuille taipumille. Tämän jälkeen taipumat korjattiin vastaamaan 20 °C vertailulämpötilaa kertomalla ne korjauskertoimilla. Päällysteen lämpötilan laskemiseen ja korjauskertoimien määrittämiseen käytettiin VTT:n (Spoof & Petäjä 2000a) kehittämiä laskentakaavoja, jotka on esitetty liitteessä G. Tutkimuksessa esitetyt kantavuudet ovat lämpötilakorjattuja, mutta jäykkyysmoduulien laskenta perustui lämpötilakorjaamattomiin taipumiin VTT:n raportin mukaisesti.

Kokonaiskantavuus laskettiin kuormituslevyn keskeltä mitatun taipuman perusteella kappaleessa 2.3.2 esitetyllä kaavalla 2.9. Alusrakenteen kantavuus laskettiin 1,2 m etäisyydeltä kuormituslevystä mitatun taipuman perusteella VTT:n raportissa (Spoof & Petäjä 2000a) esitetyllä takaisinlaskentakaavalla, jossa kerroin 0,75 vastaa Poisson-luvun arvoa 0,5.

$$M_r = \frac{0,75 \times q \times a^2}{r \times s_r} \quad (5.1)$$

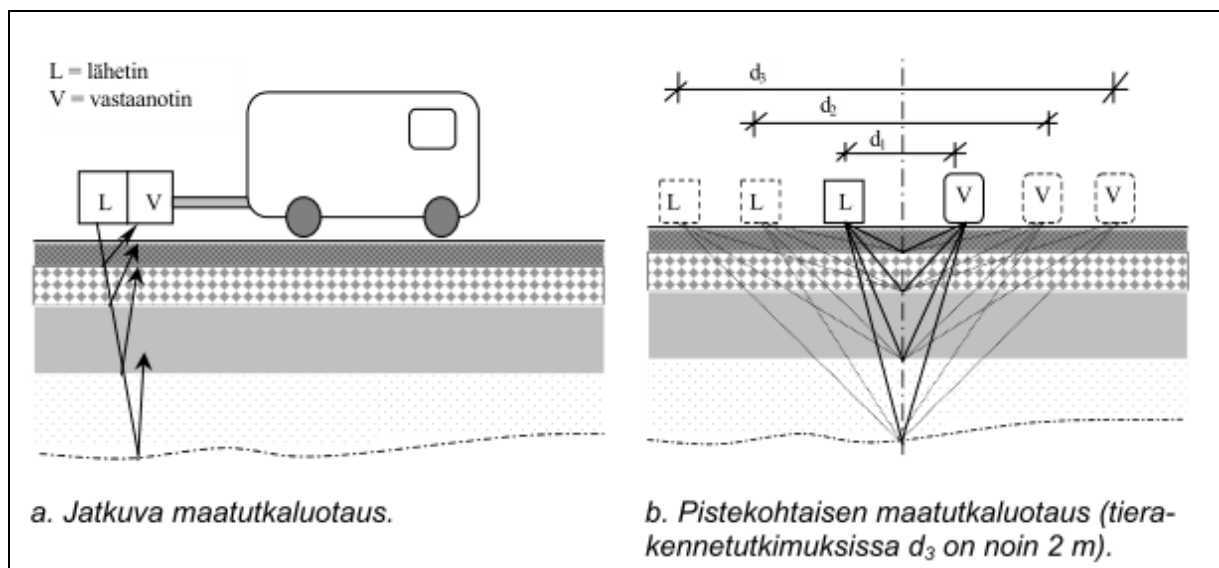
jossa

|       |  |
|-------|--|
| $M_r$ | on alusrakenteen kantavuus (MPa)                               |
| $q$   | pintajännitys 707 kPa  |
| $a$   | kuormituslevyn säde 0,15 m                                     |
| $r$   | taipuma-anturin etäisyys kuormituslevystä 1,2 m                |
| $s_r$ | mitattu taipuma etäisyydellä $r = 1,2$ m kuormituslevystä (m). |

### 5.3.2. Maatutkamittaus

Roadscanners Oy:n toimitusjohtaja FT Saarenkedon (2006) mukaan maatutkaus perustuu lyhyisiin sähkömagneettisiin pulsseihin, joiden taajuus vaihtelee yleensä välillä 10 MHz - 2,5 GHz. Maatutkauksen tulkinta tehdään takaisinheijastuneiden signaalien amplitudien ja nopeuksien perusteella, joihin vaikuttavat rakennekerrosmateriaalien sähköiset ominaisuudet. Tierakenteiden tutkimuksen kannalta tärkein arvioitava sähköinen ominaisuus on dielektrisyys, jonka perusteella arvioidaan rakennekerrosten vesipitoisuutta. Maatutkauksen avulla havaitaan tietysti myös sähkönjohtavuudeltaan selvästi varsinaisista rakennekerroksista erottuvat rakenteet, kuten teräsverkot ja putkijohdot.

Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelmassa tehdyn raportin (Korkiala-Tanttu & Onninen, 2001) mukaan maatutkaus voidaan jakaa jatkuvaan ja pistekohtaiseen maatutkukseen, joiden periaatteet on esitetty kuvassa 46. Jatkuvaan maatutkukseen luodaan jatkuva profiili esimerkiksi tielinjasta, jolloin saadaan kokonaiskuva rakennekerrospaksuuksien tai pohjamaan vaihtelusta. Mittauksessa käytetään ajoneuvon perään tai eteen kiinnitettyä tutkaa, joka sekä lähettää että vastaanottaa signaalia. Pistekohtaisessa mittauksessa lähetintä ja vastaanotinta siirretään kauemmaksi toisistaan, jolloin saadaan pistemäinen syvyysprofiili mittauskohdan alla olevien kerrosten paksuuksista ja ominaisuuksista. Pistekohtaista mittausta voidaan käyttää myös referenssimittauksena jatkuvan maatutkauksen tulkinnan helpottamiseksi.



Kuva 46. Jatkuva ja pistekohtainen maatutkaluotaus (Korkiala-Tanttu & Onninen, 2001).

Tätä tutkimusta varten käytettiin jatkuvan maatutkauksen pidemmälle kehitettyä versiota ja kuvassa 47 esitettyä Roadscanners Oy:n 3d-maatutkaa. 3d-maatutkauksessa tehdään samanaikaisesti rinnakkaisia jatkuvia tutkauksia, jotka voidaan yhdistää keskenään. Tuloksena saadaan noin 2 m leveitä jatkuvia profiileja, joita vastaavasti toisiinsa yhdistämällä on mahdollista luoda laajoja kolmiulotteisia rakenneprofiileja. Jatkäsaassa tehty maatutkaukset olisivat mahdollistaneet jopa  $25 \times 200 \text{ m}^2$  -laajuisen kolmiulotteisen

rakennemallin luomisen, mutta tutkimuksen kannalta se ei ollut kuitenkaan tarpeellista. Maatutkaustulkintojen edistyessä voitiin lisäksi päätellä, että perinteisempi 2d-maatutka olisi ollut parempi tätä tutkimusta varten.



Kuva 47. Tutkimuksessa käytetty 3d-maatutka.

Tutkimusta varten ajettiin yhteensä yli 2,5 km maatutka-autolla, mikä 3d-kalustolla tarkoittaa yli 35 km maatutkausaineistoa. Vain pieni osa tästä aineistosta oli kuitenkin mahdollista käyttää hyväksi tässä tutkimuksessa. Lisäksi 2d-tutka-aineisto on 3d-aineistoa tarkempaa, erityisesti päällystekerrosten tulkinnassa. Rinnakkaislinjojen tulkintaa käytettiin kuitenkin hyväksi yhdestä linjasta tehdyn rakennekerrostulkinnan varmentamiseen. Lisäksi Tikkurilan linja-autoterminalin tulkinta-aineistossa on esitetty poikkileikkausprofiilit valituista kohdista, mutta niissä ei näy rakennekerrostulkintoja. Rinnakkaistulkintoja ei aikataulullisista syistä ollut mahdollista tehdä, ja harkitsemattomasti tehdyt tulkinnat olisivat voineet johtaa väärään päätelmään poikkileikkausprofiilista.

## 5.4. Jäykkyysmoduulien suoralaskenta

### 5.4.1. Takaisinlaskennan ja suoralaskennan erot

Jäykkyysmoduulit on perinteisesti määritetty takaisinlaskentamenetelmällä pudotuspainolaitteen mittaamista taipumasuppiloista, kun rakennekerrosten paksuudet tiedetään. Takaisinlaskennassa pyritään iteratiivisesti moduuleja muuttamalla määrittämään rakenne, jonka laskennallisesti määritetty taipumasuppilo vastaa pudotuspainolaitteella mitattua taipumasuppiloa (Spoof & Petäjä, 2000b). Yhdysvaltojen tiehallinnon (FHWA) LTPP-tutkimusohjelmassa (Stubstad ym., 2006) kehitettiin uusi suoralaskennan teoria moduulien laskentaan. LTPP:n (Long-Term Pavement Performance) tavoitteena oli kerätä ja analysoida vuoteen 1998 mennessä tehtyjen pudotuspainomittausten aineisto ja kehittää vaihtoehtoinen laskentamenetelmä takaisinlaskettujen moduulien oikeellisuuden arvioimiseksi.

Takaisinlaskenta perustuu kaikkien mitattujen taipumien eli koko taipumasuppilon hyödyntämiseen sekä olettamuksiin, että kaikki rakennekerrokset ovat elastisia, isotrooppisia ja homogeenisia. Nämä olettamukset eivät kuitenkaan yleensä pidä paikkaansa, jolloin taipumasuppilon täydellinen jäljittely johtaa helposti väärin päätelmiin rakennekerrosten jäykkyysmoduuleista. Takaisinlaskennassa käytetyn iteratiivisen laskentamenetelmän sijasta suoralaskennassa hyödynnetään suljettuja laskentakaavoja. Kaavoja käytetään päällystekerroksen ja pohjamaan jäykkyysmoduulien suoraan laskentaan. Päällystekerroksen ja pohjamaan välissä olevien kerrosten jäykkyysmoduulit lasketaan joko pohjamaan jäykkyysmoduulin perusteella tai perinteisellä takaisinlaskennalla, kuten tässä tutkimuksessa. Suoralaskennan teoria ja laskentakaavat on esitetty liitteessä H.

LTTP:ssä tehdyn arvion mukaan suoralaskennan edut ovat:

- Päällystekerroksen ja pohjamaan jäykkyysmoduulit ovat riippumattomia muista jäykkyysmoduuleista toisin kuin takaisinlaskennassa, jossa alempien kerrosten laskennassa tehdyt virheet kompensoituvat ylempiin kerroksiin.
- Takaisinlaskennan iteratiivinen laskentatapa on vaativampi ja tulosten oikeellisuuden jatkuva arviointi vaatii paljon ammattitaitoa.

Suoralaskennassa havaittiin myös seuraavat haitat:

- Päällystekerroksen ja pohjamaan laskentatulokset ovat riippumattomia muista taipumista, joten ne eivät välttämättä korreloi kuormituslevyn keskeltä mitatun rakennekerrosten kokonaistaipuman kanssa.
- Päällysteen ja pohjamaan välisten rakennekerrosten jäykkyysmoduulit perustuvat pohjamaan laskennalliseen jäykkyysmoduuliin tai takaisinlaskentaan, joten ne eivät ole riippumattomia muiden kerrosten jäykkyysmoduuleista.
- Takaisinlaskettujen arvojen tapaan jäykkyysmoduuleja voidaan pitää vain arvioina, joten ne eivät välttämättä vastaa esimerkiksi laboratoriossa mitattuja jäykkyysmoduuleja.

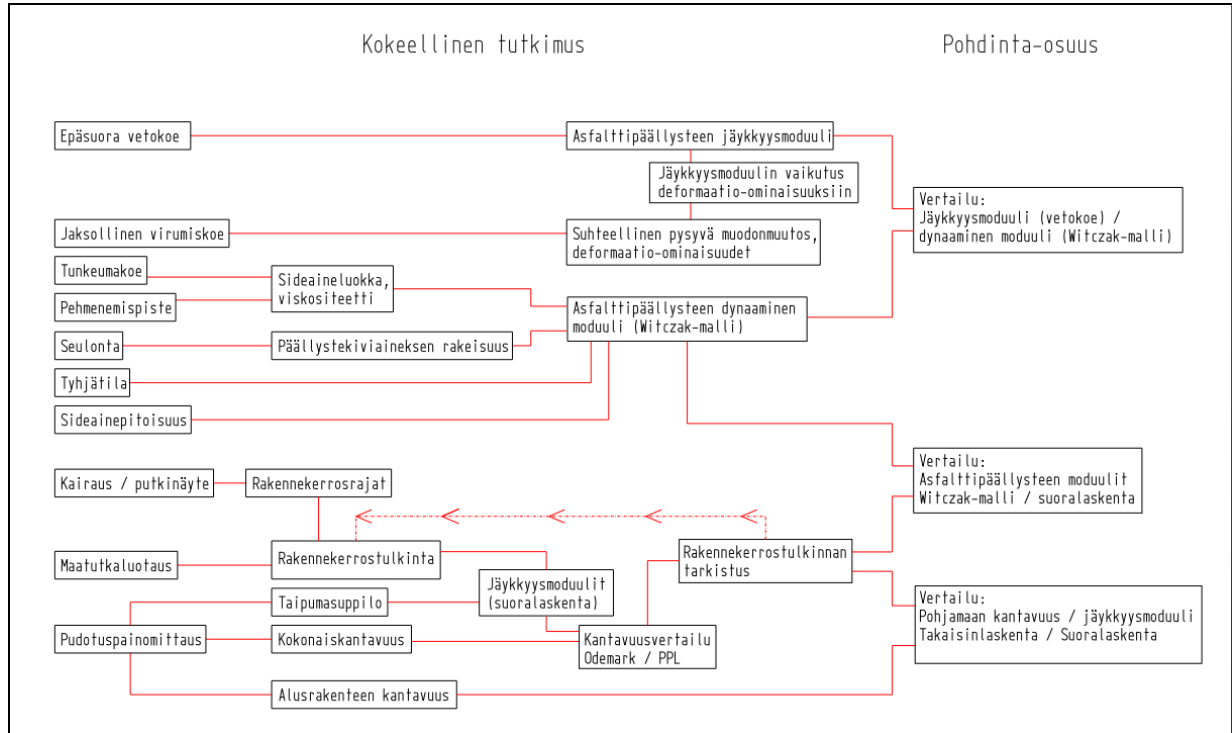
#### **5.4.2. Suoralaskenta Road Doctor Pro:lla**

Tässä tutkimuksessa suoralaskenta tehtiin Road Doctor Pro:lla, joka käyttää laskennan lähtötietoina maatutkaustulkinnan kerrospaksuuksia ja pudotuspainolaitteen mittaamia taipumia. Suoralaskennan tuloksena saadaan eri rakennekerrosten jäykkyysmoduulit. Rakennekerrosten paksuuksia ja moduuleita käytetään sen jälkeen lähtötietoina laskettaessa rakenteen kokonaiskantavuutta, jonka Road Doctor Pro laskee Odemarkin kantavuusyhtälöllä. Laskennallista kantavuutta verrataan pudotuspainolaitteella mitattuun kantavuuteen ja korjataan tarvittaessa rakennekerrostulkintaa, jos laskennallinen ja mitattu kantavuus eroavat liikaa toisistaan. Ohjelmassa joudutaan valitsemaan yläraja laskennallisille jäykkyysmoduuleille. Laboratoriokokeiden perusteella päällysteen jäykkyysmoduulin ylärajaksi määritettiin 12 000 MPa, joka osoittautui tehdyissä tarkasteluissa kuitenkin paikoittain liian alhaiseksi arvoksi.



## 5.5. Kokeellisten menetelmien yhteenveto ja koekohteet

Kuvassa 48 on esitetty yhteenvetona kokeellisen tutkimuksen eteneminen ja määritettävät parametrit.



Kuva 48. Yhteenveto kokeellisesta tutkimuksesta.

Mittauskohteiksi pyrittiin valitsemaan alueita, jotka ovat olleet raskaan kuormituksen alaisina. Erityisesti pyrittiin hakemaan alueita, joilla esiintyy myös staattista kuormitusta. Kustannussyistä kohteet jouduttiin rajaamaan pääkaupunkiseudulle. Lisäksi koekohteiden joukosta valittiin kolme pääkohdetta, joissa tehtiin kaikki tutkimukset. Muissa kohteissa tehtiin ainoastaan pudotuspainomittaukset Heavy Loadmanilla.

Koekohteet (pääkohteet lihavoidulla) olivat

- **Jätkäsaaren Saukonlaituri**
- **Sompasaaren satamakenttä**
- **Tikkurilan linja-autoterminaali**
- Vuosaaren satama (2 koekohdetta)
- Helsingin maaliikennekeskus, MLK
- Nihtisillan linja-autovarikko
- Suomenojan linja-autovarikko.

Taulukossa 18 on esitetty yhteenveto kokeellisista tutkimuksista koekohteittain. Taulukossa 19 on esitetty vertailuna Länsisataman, Sörnäisten sataman ja Vuosaaren sataman tavaraliikennemäärät sekä Vuosaaren sataman rakennekerrosten mitoitusliikennemäärä.

Taulukko 18. Tutkimukset koekohteittain

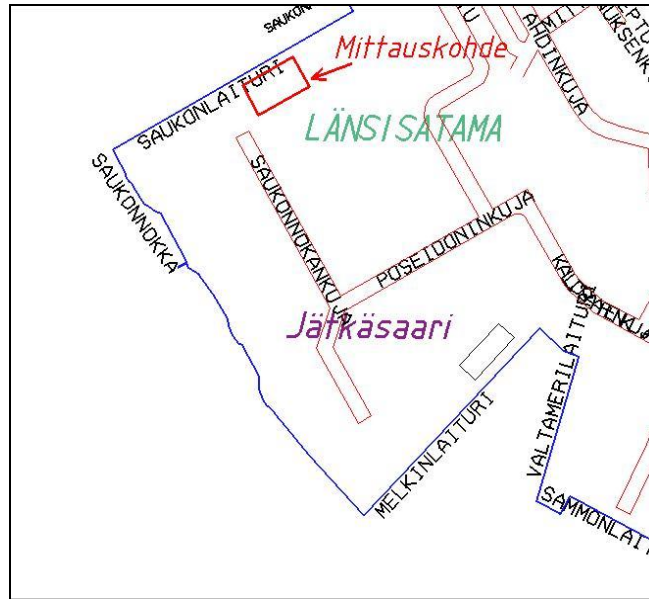
| Koekohde   | Kenttäkokeet       |      |               |   | Laboratoriokokeet,<br>koekappaleiden määrä |                      |                 |                                  |
|------------|--------------------|------|---------------|---|--|----------------------|-----------------|----------------------------------|
|            | PPL-<br>mittaukset |      | Maa-<br>tutka | Sitomattomien<br>rakennekerrosten<br>tutkimus | Näytteet                                   | Jäykkyys-<br>moduuli | Virumis-<br>koe | Sideaine-<br>kokeet,<br>seulonta |
|            | Load-<br>man       | KUAB |               |   |  |                      |                 |                                  |
| Jätkäsaari | X                  | X    | X             | Kairaus                                       | 6  | 6                    | 3               | 1                                |
| Sompasaari | X                  | X    | X             | -   | 7  | 4                    | 7               | 1                                |
| Tikkurila  | X                  | X    | X             | Putkinäyte                                    | 11   | 11                   | 10              | 3                                |
| Vuosaari   | X                  | -    | -             | -   | -  | -                    | -               | -                                |
| MLK        | X                  | -    | -             | -   | -  | -                    | -               | -                                |
| Nihtisilta | X                  | -    | -             | -   | -  | -                    | -               | -                                |
| Suomenoja  | X                  | -    | -             | -   | -  | -                    | -               | -                                |

Taulukko 19. Helsingin satamien tavaraliikennemäärät (Helsingin satama, 2005, 2009-I & 2010)

|                                    | Länsisatama<br>(2008) | Sörnäinen<br>(2008) | Vuosaaren satama |                  |
|------------------------------------|-----------------------|---------------------|------------------|------------------|
|                                    |                       |                     | Toteuma (2009)   | Mitoitusliikenne |
| Konttiliikenne,<br>TEU             | 316 000               | 59 000              | 359 000          | 400 000          |
| Kuorma-autot ja<br>perävaunut, kpl | 208 000               | 206 000             | 243 000          | 200 000          |

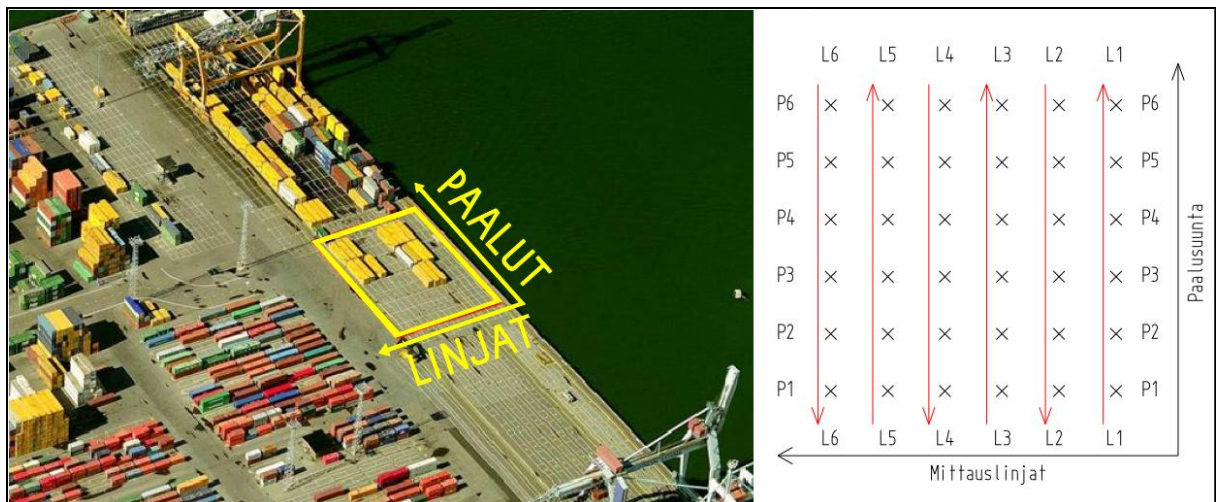
### 5.5.1. Jätkäsaaren Saukonlaituri

Saukonlaituri sijaitsee Länsisataman pohjoisrannalla ja oli mittausten kannalta sopivasti täysin autio. Koekentän sijainti on esitetty kartalla kuvassa 49. Mittausten aikaan Jätkäsaaren entisen tavarasataman rakenteet olivat purkutöiden alaisina ja alueella alkoi uuden Jätkäsaaren asuinalueen rakentaminen. Sataman vielä toimiessa koekohde sijaitsi portaalinosusturin kiskojen välissä ja oli toiminut konttialueena. Koerakenne oli siis ollut erittäin raskaan kuormituksen alaisena jo vuosikymmeniä. Päällysteessä oli havaittavissa konttijalkojen aiheuttamia painumajälkiä, mutta muuten se oli hyväkuntoinen.



Kuva 49. Jätkäsaaren mittauskohde.

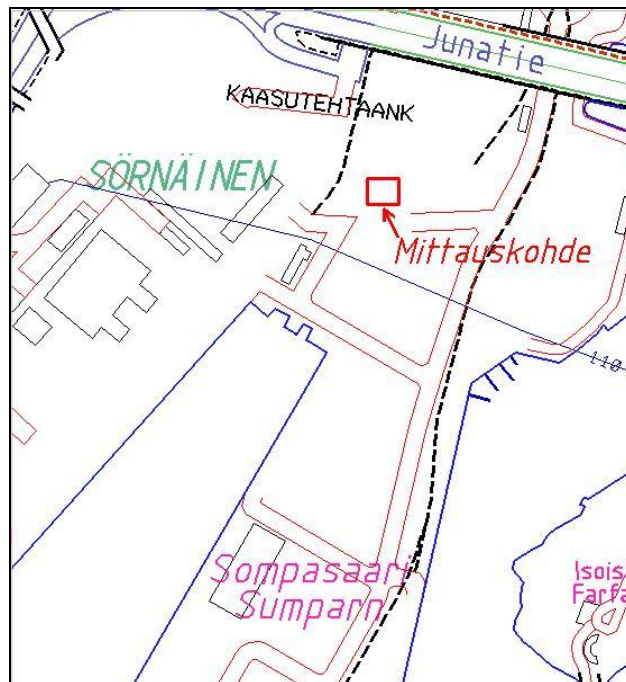
Mittauskenttä määritettiin neliön muotoiseksi ja se oli kooltaan  $25 \times 25 \text{ m}^2$ . Pudotuspainopisteet sijaitsivat viiden metrin välein ja niitä oli yhteensä 36. Maatutkaus tehtiin vierekkäisinä linjoina, joilla koko kentän alue saatiin mitattua. Kuvassa 50 on esitetty Jätkäsaaren pudotuspainomittausten kaavio sekä tässä tutkimuksessa käytettävä mittauslinjojen ja paalunumeroinnin järjestys. Pudotuspainomittaukset tehtiin punaisten nuolien mukaisesti, jolloin joka toinen mittauslinjoista tehtiin lopullisen paalunumeroinnin vastaisesti. Tulokinnan helpottamiseksi kaikki mittauslinjat käännettiin kuitenkin ensimmäisen mittauslinjan suuntaisiksi. Jatkossa pudotuspainomittaukset esitetään mittauslinjojen ja paalunumeroiden avulla. Jätkäsaarella ensimmäinen paalunumero on 26, koska paalut on merkitty varsinaisen mittauskentän ulkopuolelta aloitettujen maatutkauslinjojen mukaan. Päällystenäytteet otettiin koekentältä satunnaisista paikoista eikä niiden ottopaikkoja ole tarkemmin merkitty muistiin.



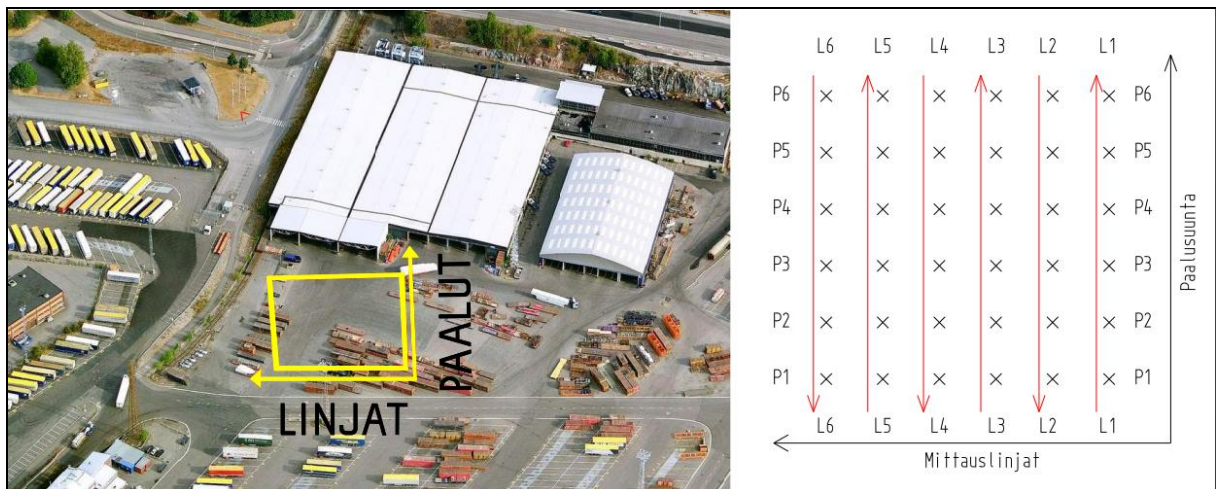
Kuva 50. Jätkäsaaren mittauskohde satamakäytössä sekä mittauksen etenemissuunta ja paalusuunta (Helikopterikuva: Blom Kartta Oy).

### 5.5.2. Sompasaaren satamakenttä

Sompasaaren mittauskohde sijaitsee vanhan Sompasaaren satamakentän alueella Itävyylän eteläpuolella. Koekohteen sijainti on esitetty tarkemmin kartalla kuvassa 51. Sataman toimiessa koekohteen paikalla säilytettiin kontteja ja sen vieressä oli kuvassa 52 näkyvä satamaoperaattorin suuri varastohalli. Mittausten aikaan vanhoja satamarakenteita purettiin ja alueelle alettiin rakentaa uutta Kalasataman asuinalueita. Päälyste oli hyväkuntoinen eikä siinä havaittu konttijalkojen aiheuttamia painumia. Pudotuspainomittaukset ja maatutkaus tehtiin kuten Jätkäsaarella. Mittauslinjojen ja paalunumeroinnin järjestys on esitetty kuvassa 52. Sompasaarella ensimmäisen paalun numero oli 13. Päälystenäytteet otettiin koekentältä satunnaisista paikoista eikä niiden ottoapaikkoja ole tarkemmin merkitty muistiin.



Kuva 51. Sompasaaren mittauskohde.



Kuva 52. Sompasaaren mittauskohde satamakäytössä sekä mittausten etenemissuunta ja paalusuunta (Helikopterikuva: Blom Kartta Oy).



### 5.5.3. Tikkurilan linja-autotermiinaali

Tikkurilan linja-autotermiinaali sijaitsee Vantaan Tikkurilassa matkakakeskuksen ja Tikkurilan rautatieaseman välissä. Linja-autotermiinaalin sijainti on esitetty kartalla kuvassa 53 ja kuvan 54 ilmakuvassa. Vantaan kaupungin päällystystöistä vastaavan Jorma Alangon mukaan termiinaali on rakennettu ilmeisesti vuonna 1983 katuluokan 3 ja päällysrakenteen 3E mukaan. Suunnitelmien mukaiset rakennekerrokset on esitetty taulukossa 20. Rakennetta on parannettu ilmeisesti vuosina 1990 - 1991 Hotelli Vantaan rakentamisen yhteydessä, jolloin osa vanhasta rakenteesta korvattiin uudella ja osa jätettiin uuden rakenteen alle. Vuonna 1998 raskaimmin kuormitettu osa linja-autotermiinaalista päällystettiin hyvin deformaatiota kestäväällä komposiittipäällysteellä. Kesällä 2010 myös komposiittipäällysteessä oli havaittavissa syviä urakohtia, jotka ovat syntyneet linja-autojen seisoessa pysäkeillä. Noin kaksi kuukautta mittausten jälkeen komposiittipäällystetyt alueet korvattiin uudella asfaltilla. Linja-autotermiinaali on tarkoitus siirtää myöhemmin kokonaan eri paikkaan ja nykyisen paikalle rakennetaan toimistorakennuksia.



Kuva 53. Tikkurilan linja-autotermiinaalin mittauskohde.

Taulukko 20. Tikkurilan linja-autotermiinaalin rakennekerrokset suunnitelmista

| Rakennekerros                  | Paksuus [mm] |
|--------------------------------|--------------|
| Päällyste, AB20                | 90           |
| Kantava kerros, Murske 0/30 mm | 200          |
| Jakava kerros, Sora 0/100 mm   | 200          |
| Tukikerros, Sora 0/65 mm       | 400          |
| Kokonaisrakennepaksuus         | 890          |

Tikkurilan linja-autotermiinaalissa pudotuspainomittaukset tehtiin viiden metrin välein neljässä linjassa. Mittauslinjat 1 ja 2 kulkivat vierekkäin ja mittauslinjat 3 ja 4 vierekkäin. Kaikista mittauslinjoista ei ollut mahdollista tehdä mittauslinjan 1 pituisia, koska linja-

autoterminalin alla on paljon kunnallisteknisiä rakenteita ja telekaapeleita. Putkijohtojen ja kaapeleiden paikat oli etukäteen tarkistettu putki- ja johtokartoista. Mittauslinjasta 1 jäi myös pudotuspainomittauksia tekemättä 15 metrin matkalta maanalaisten rakenteiden vuoksi. Mittauslinjat on esitetty kuvassa 54.



Kuva 54. Tikkurilan linja-autoterminali ilmasta (Blom Kartta Oy).

Päällysteporanäytteet otettiin ajourien välistä viidestä kohdasta, joista porattiin kaksi rinnakkaisnäytettä. Poranäytepisteiden valinnassa pyrittiin ottamaan huomioon myös päällysteaikkaukset, joten poranäytteitä otettiin eri puolilta linja-autoterminalia. Näin poranäytteitä saatiin useammasta linja-autoterminalissa käytetystä päällystemassasta. Liitteissä D.1 ja D.2 on esitetty tarkemmat kartat mittauskohteesta, joissa näkyvät pudotuspainomittauksen pisteet, maatutkauslinjat, poranäytepisteet sekä putkinäytteen ottokohta.

#### 5.5.4. Muut koekohteet

##### Vuosaaren satama

Vuosaaren satamasta oli saatavilla suunnitelmapiirustukset ja liitteessä C.2 esitetyt mittauspaikat pyrittiin valitsemaan sekä rakennekerrosratkaisujen että vallitsevan kuormituksen perusteella. Mittauspaikoiksi valittiin lopulta koerakenteen alue, jossa on stabiloitu kantava kerros sekä alue, jossa on tavallinen sitomaton kantava kerros. Koekohteiden rakennekerrokset on esitetty taulukossa 21.

Taulukko 21. Vuosaaren koekohteiden rakennekerrokset

| Vuosaari, koekohde 1<br>Rakennekerros   | Paksuus<br>[mm] | Vuosaari, koekohde 2<br>Rakennekerros | Paksuus<br>[mm] |
|---|-----------------|---------------------------------------|-----------------|
| AB 20 B50/70  | 50              | AB 20 B50/70                          | 50              |
| Stabiloitu kalliomurske *   | 200             | ABK 32 B50/70                         | 70              |
| Jakava murske 0/63  | 100             | Kantava murske 0/32                   | 100             |
| Jakava murske 0/150   | 300             | Jakava murske 0/90 (150)              | 550             |
| Merihiekka  | 550             | Merihiekka                            | 430             |
| Kokonaisrakennepaksuus  | 1200            | Kokonaisrakennepaksuus                | 1200            |
| * Kalliomurske + 12 paino-% sideainetta (2 % sementtiä, 2 % masuuni-<br>kuonajauhetta, 4 % lentotuhkaa, 4 % rikinpoiston lopputuotetta) |                 |                                       |                 |

### Vuosaaren satama, koekohde 1 (stabiloitu kantava kerros)

Koekohteeksi 1 nimetty stabiloidun kantavan kerroksen mittausalue toimii konttien välivarastointipaikkana. Koekohteen tarkempi sijainti on esitetty liitteessä C.6. Alue oli uudelleenpäällystetty kesällä 2009 tehdyn vauriotutkimuksen (Helsingin Satama, 2009b) jälkeen, kun päällysteessä oli havaittu vakavia vaurioita. Kuvasta 55 voidaan havaita, että asfalttipäällyste oli purkautunut joissakin paikoissa kokonaan. Vauriotutkimuksen perusteella vaurioiden syynä oli paikoitellen alle vaatimustason jäänyt asfalttipäällystepaksuus. Pudotuspainomittausten aikana tehdyn silmämääräisen arvion perusteella joissakin kohdissa oli kuvassa 56 näkyviä kulumajälkiä, jotka ovat ilmeisesti syntyneet konttien raahaamisesta. Päällyste oli muuten hyvässä kunnossa.



Kuva 55 vasemmalla. Vauriokatselmus kesäkuussa 2009 (Helsingin Satama, 2009b).

Kuva 56 oikealla. Kulumajälkiä Vuosaaren sataman koekohteessa 1.

### Vuosaaren satama, koekohde 2 (sitomaton kantava kerros)

Koekohteeksi 2 nimetty sitomattoman kantavan kerroksen alue toimii trailerikenttänä. Myös koekohteessa 2 päällyste oli hyvässä kunnossa lukuun ottamatta kuvassa 57 näkyviä selviä



reikiä, joissa oli paljastunut myös osia sitomattomasta kerroksesta. Reiät ovat selvästi syntyneet trailerijalkojen raahautuessa pitkin asfaltin pintaa. Trailerijalkojen aiheuttamia painumakohtia ei ollut kuitenkaan havaittavissa.



Kuva 57. Reiät Vuosaaren koekohteen 2 päällysteessä.

### **Helsingin maaliikennekeskus, MLK**

Kuvassa 58 esitetty Helsingin maaliikennekeskuksen mittauskohde oli perävaunujen ja trailereiden säilytyskenttä kahden logistiikkahallin välissä. Maaliikennekeskus on otettu käyttöön vuonna 1970 ja se on ollut raskaan kuormituksen alaisena jo yli 40 vuotta (Kaukokiito Oy, 6.4.2011). Mittauskentällä oli useita trailerijalkojen ja renkaiden aiheuttamia painumia. Päällysteessä oli havaittavissa paljon paikkausjälkiä. Maaliikennekeskus on ilmeisesti perustettu pääasiassa louhitun kallion päälle.



Kuva 58. Helsingin maaliikennekeskuksen mittauskenttää.



## Nihtisillan ja Suomenojan linja-autovarikot

Nihtisillan linja-autovarikko Espoossa on otettu käyttöön vuonna 1990 (Nobina Finland Oy, 6.4.2011). Varikko on perustettu louhitulle kallioalueelle. Suomenojan linja-autovarikko on ollut käytössä ilmeisesti pidempään ja se on perustettu pehmeälle savikolle. Molemmilla linja-autovarikoilla päällyste oli hyvässä kunnossa eikä mainittavia vaurioita ollut.

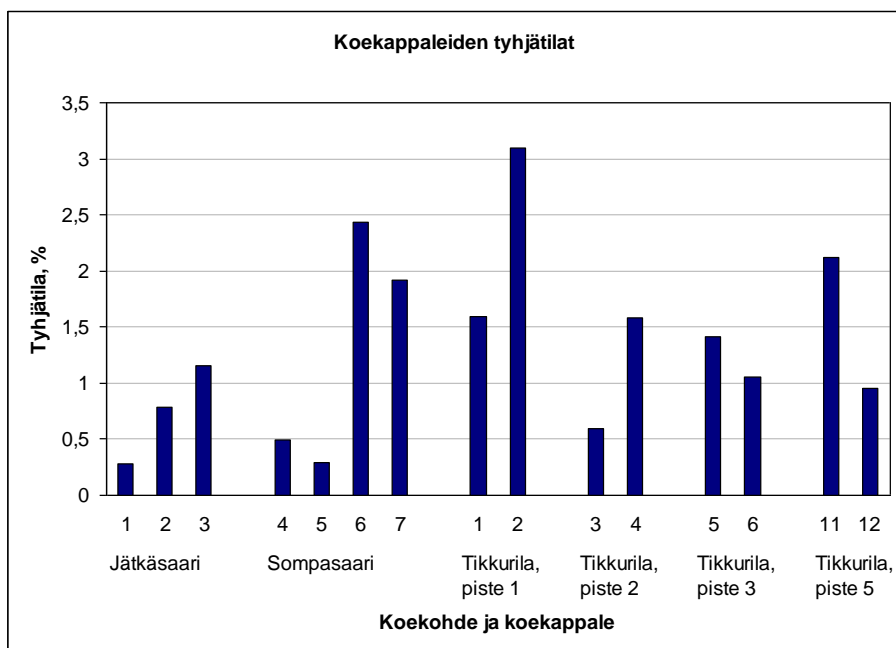
## 6. TULOKSET

### 6.1. Laboratoriokokeet

#### 6.1.1. Päällystekiviaineksen rakeisuus ja koekappaleiden tyhjätilat

Koekappaleiden ulkomitat, massat, päällystetiheydet, massojen maksimitiheydet ja tyhjätilat on esitetty taulukkoina liitteissä I.1 ja I.2 sekä päällystekiviaineksen rakeisuuskäyrät liitteessä I.3. Rakeisuuskäyrien perusteella Jätkäsaarella ja Sompasaarella käytetty päällyste on AB16 ja Tikkurilan linja-autoterminalissa suunnitelmissa mainittu AB20.

Jätkäsaarella tyhjätilat määritettiin koekappaleille 1 - 3, jotka olivat ylemmästä päällystekerroksesta. Jätkäsaaren koekappaleet 4 - 6 olivat vastaavasti alemmasta päällystekerroksesta. Sompasaarella tyhjätilat määritettiin koekappaleista 4 - 7, joista määritettiin myös jäykkyysmoduulit. Koekappaleet 1 - 3 olivat halkaisijaltaan jäykkyyskokeeseen sopimattomia, eikä niistä määritetty myöskään tyhjätiloja. Tikkurilan pisteen 4 ylempi päällystekerros oli komposiittiasfalttia ja alemmasta kerroksesta jouduttiin hylkäämään yksi näyte. Pisteen 4 koekappaleista ei määritetty tyhjätilaa. Kuvan 59 kuvaajasta voidaan havaita, että tyhjätilat ovat pääasiassa pieniä. Toisaalta myös vaihtelu on suhteellisen suurta jopa rinnakkaisnäytteiden välillä.



Kuva 59. Koekappaleiden tyhjätilat.

### 6.1.2.Sideainepitoisuudet, tunkeumakoe ja pehmenemispisteen määrittäminen

Taulukossa 22 on esitetty viiden koekappaleen sideainepitoisuudet sekä sideaineiden tunkeumat ja pehmenemispisteet. Kaikki tulokset on esitetty liitteessä I.4.

Taulukko 22. Sideainepitoisuudet, tunkeumat ja pehmenemispisteet

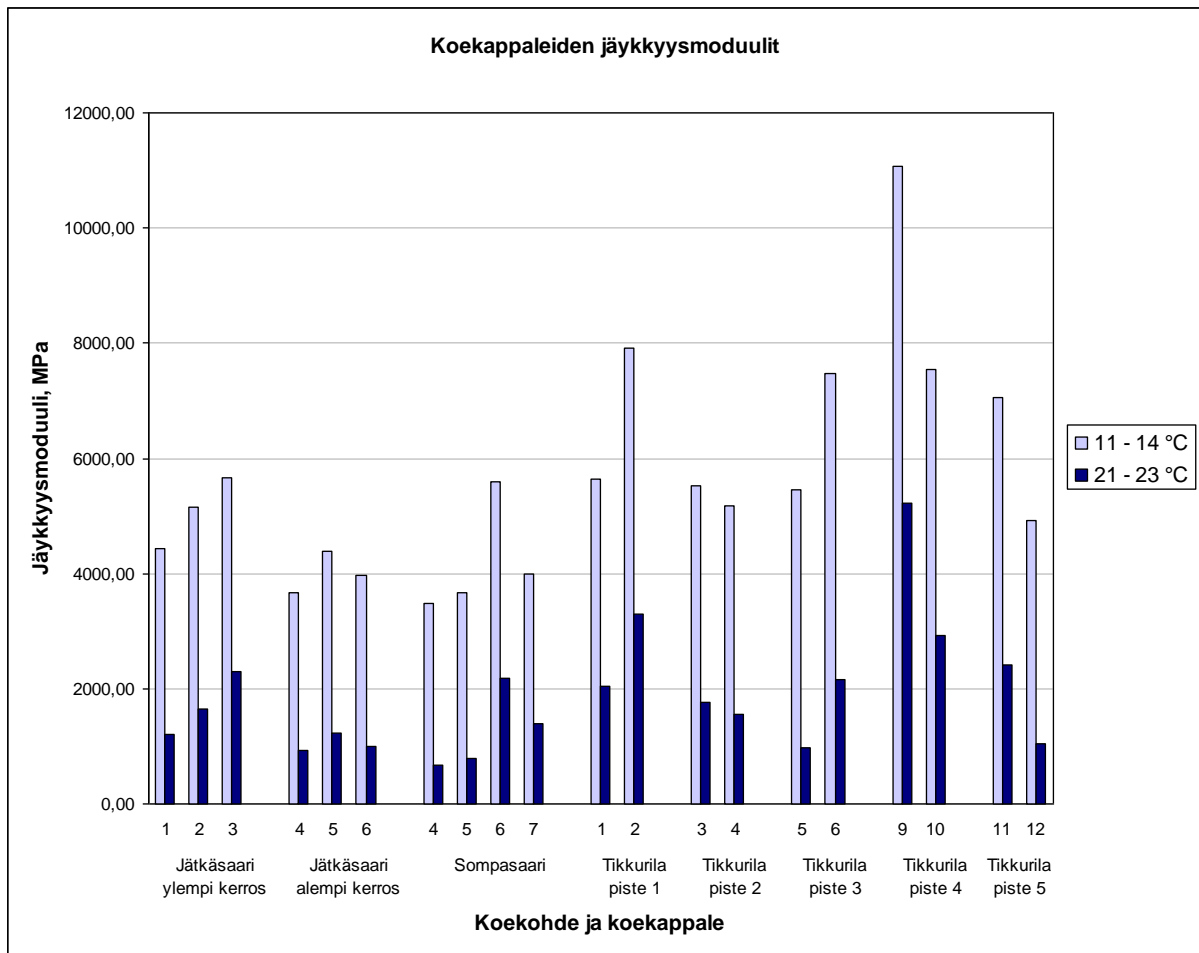
| Koekappale                      | Sideainepitoisuus<br>[ % ] | Tunkeuma<br>[ 1 / 10 mm ] | Pehmenemispiste<br>[ °C ] |
|---------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Jätkäsaari, koekappale 1        | 5,4                        | 65                        | 46,8                      |
| Sompasaari, koekappale 4        | 5,7                        | 79                        | 46,4                      |
| Tikkurila piste 1, koekappale 2 | 4,7                        | 41                        | 57,2                      |
| Tikkurila piste 2, koekappale 4 | 5,4                        | 83                        | 47,8                      |
| Tikkurila piste 3, koekappale 5 | 5,2                        | 109                       | 42,8                      |

Sideaineiden tunkeumat olivat kaikissa kolmessa koekohteessa epätavallisen suuria, kun otetaan huomioon myös sideaineen koveneminen rakenteessa. Ainoastaan Tikkurilan linja-autotermiinalin näytteestä 2 mitattu 41 1/10 mm oli normaali mittaustulos, jolloin alkuperäinen bitumiluokka olisi ollut luultavasti B 70/100 (PANK, 2007). Jätkäsaarella ja Sompasaarella käytetty bitumi on ollut luultavasti luokkaa B 120. Tikkurilan linja-autotermiinalin näytteen 5 mittaustulokset viittaavat kuitenkin erittäin pehmeään B 200-bitumiin, mikä herätti epäilyjä tulosten luotettavuudesta alkuperäisten bitumiluokkien arvioinnissa. Todennäköisimpänä syynä tuloksille pidettiin työkoneista ja linja-autoista tippuneen dieselöljyn joutumista päällystekerrokseen ja samalla myös sideainenäytteisiin. Myös Aalto-yliopiston liikenne- ja tietekniikan tutkimusryhmän laboratoriimestari Petri Peltonen sai samoja tuloksia myöhemmin syksyllä 2010 tehdyissä uusintakokeissa, joten kesällä mitatut suuret tunkeumat eivät johtuneet myöskään mittausvirheestä. Tunkeumaneula asetettiin näytteen pintaan niin, että neulan varjo ja neulan pää kohtasivat.

### 6.1.3.Epäsuora vetokoe

Kokeissa tasaisen testilämpötilan säilyttäminen tuotti ongelmia erityisesti, koska käytössä olleen lämpökaapin ovea täytyi avata koekappaleiden kääntämisen ja antureiden säätämisen yhteydessä. Ongelmat testauslämpötilan kanssa johtivat aiottua korkeampiin testauslämpötiloihin. Lopulta testauslämpötilat olivat noin 2 °C korkeammat kuin tavoitteelliset lämpötilat. Yksityiskohtaisempi testiraportti on liitteenä E.

Mitatut jäykkyysmoduulit on esitetty kuvassa 60 sekä yhteenvetona taulukossa 23. Kuvaan ei ole merkitty Tikkurilan linja-autotermiinalin pisteen 4 alemman asfalttibetonikerroksen yksittäisen näytteen jäykkyysmoduuleja, jotka on esitetty kuitenkin taulukossa 23. Matalammassa lämpötilassa mitatut jäykkyysmoduulit lämpötiloineen on esitetty liitteessä I.5 ja korkeammassa lämpötilassa mitatut jäykkyysmoduulit liitteessä I.6. Suurimmat jäykkyysmoduulit mitattiin Tikkurilan linja-autotermiinalista ja erityisesti komposiittipäällystenäytteistä. Kappaleessa 8 jäykkyysmoduulien suuruutta verrataan vielä parannetulla Witczakin mallilla laskettuihin dynaamisiin moduuleihin.



Kuva 60. Koekappaleiden jäykkyysmoduulit.

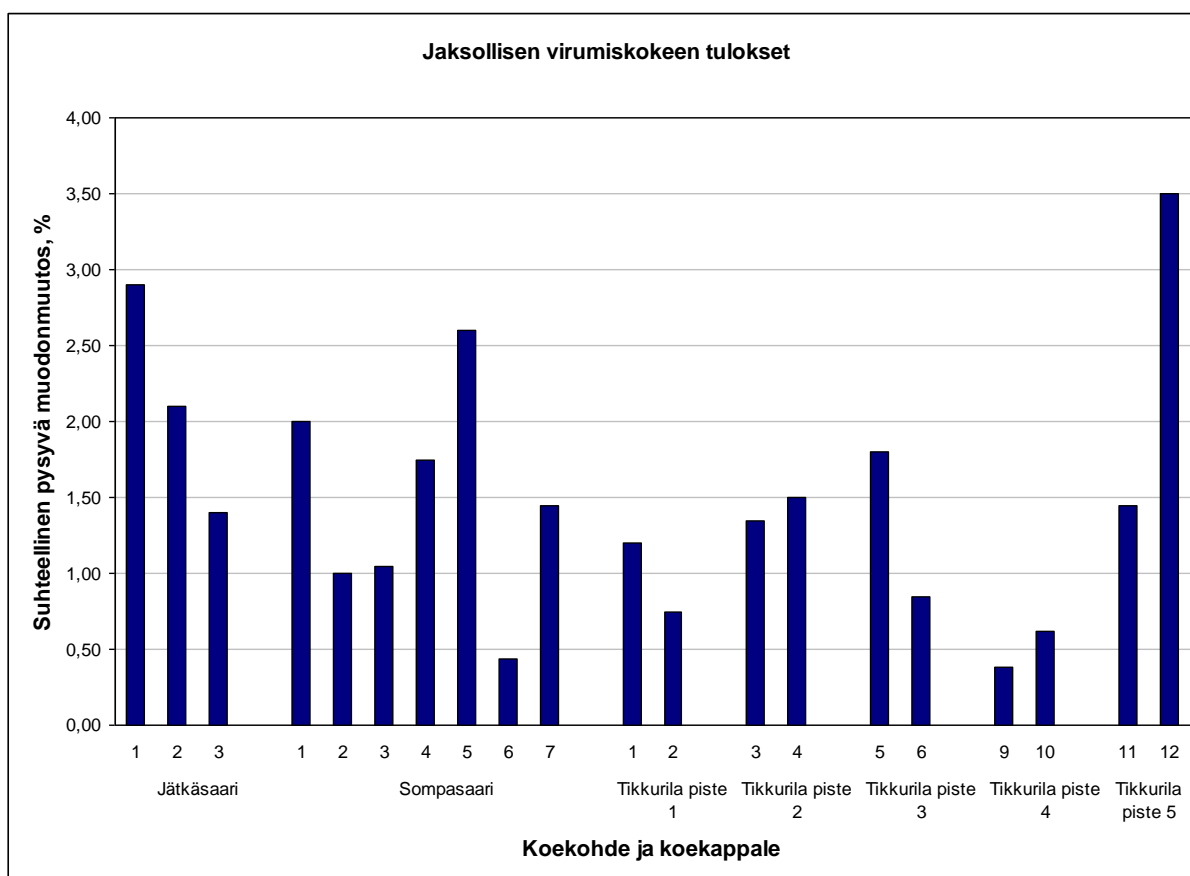
Taulukko 23. Yhteenveto mitatuista jäykkyysmoduuleista

| Koekohde                  | Jäykkyysmoduuli 11 - 14 °C |                    | Jäykkyysmoduuli 21 - 23 °C |                    |
|---------------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|
|                           | Keskiarvo [MPa]            | Keskihajonta [MPa] | Keskiarvo [MPa]            | Keskihajonta [MPa] |
| <b>Jätkäsaari, kaikki</b> | <b>4552,1</b>              | 743,2              | <b>1386,4</b>              | 513,6              |
| Ylempi kerros             | <b>5087,5</b>              | 624,8              | <b>1719,2</b>              | 549,7              |
| Alempi kerros             | <b>4016,7</b>              | 158,7              | <b>1053,7</b>              | 158,7              |
|                           |                            |                    |                            |                    |
| <b>Sompasaari</b>         | <b>4183,6</b>              | 968,4              | <b>1257,9</b>              | 687,6              |
|                           |                            |                    |                            |                    |
| <b>Tikkurila, kaikki</b>  | <b>6537,6</b>              | 1937,0             | <b>2218,6</b>              | 1259,0             |
| Piste 1                   | <b>6770,0</b>              | 1607,3             | <b>2662,0</b>              | 885,3              |
| Piste 2                   | <b>5347,0</b>              | 254,6              | <b>1665,0</b>              | 142,8              |
| Piste 3                   | <b>6458,0</b>              | 1422,7             | <b>1572,3</b>              | 829,8              |
| Piste 4, komposiitti      | <b>9299,0</b>              | 2493,3             | <b>4077,0</b>              | 1635,5             |
| Piste 4, asfalttobetoni   | <b>4186,0</b>              | -                  | <b>995,5</b>               | -                  |
| Piste 5                   | <b>5990,0</b>              | 1515,3             | <b>1728,5</b>              | 978,6              |

#### 6.1.4. Jaksollinen virumiskoe

Deformaatiokokeen testauslämpötilana käytettiin standardinmukaista 40 °C:ta. Virumiskoe on kestoltaan jäykkyyskoetta huomattavasti pidempi, joten lämpökaapin oven säännöllinen avaaminen ei ollut kokeessa tarpeellista. Useampia tunteja kestäneiden kokeiden aikana lämpötila kaapissa kohosi kuitenkin yli standardinmukaisen testauslämpötilan jopa 45 °C:een, koska lämpökaappiin ei saatu riittävästi kylmää korvausilmaa. Kaappi ottaa korvausilman suoraan testilaboratoriosta, jonka keskimääräinen lämpötila oli heinäkuussa 2010 noin 27 - 30 °C. Yksityiskohtaisempi testiraportti on liitteenä F. Jaksollisen virumiskokeen tulokset on esitetty kuvassa 61 sekä yhteenvetona taulukossa 24. Kaikki tulokset on esitetty liitteessä I.7.

Tuloksia on vertailtu 3600 kierroksen jälkeisen suhteellisen pysyvän muodonmuutoksen perusteella. Jätkäsaarella ja Tikkurilan linja-autoterminaalin pisteessä numero 4 virumat mitattiin ainoastaan ylemmästä komposiittipäällystekerroksesta. Myös virumiskokeiden tulosten perusteella voidaan päätellä, että Tikkurilan linja-autoterminaalin deformaatio-ongelmat eivät johdu liian pehmeästä tai erityisen deformaatioherkästä päällysteestä. Lukuun ottamatta pisteen numero 5 toista näytettä kaikki linja-autoterminaalien koekappaleet kuuluivat parhaaseen deformaatioluokkaan I (PANK, 2007).

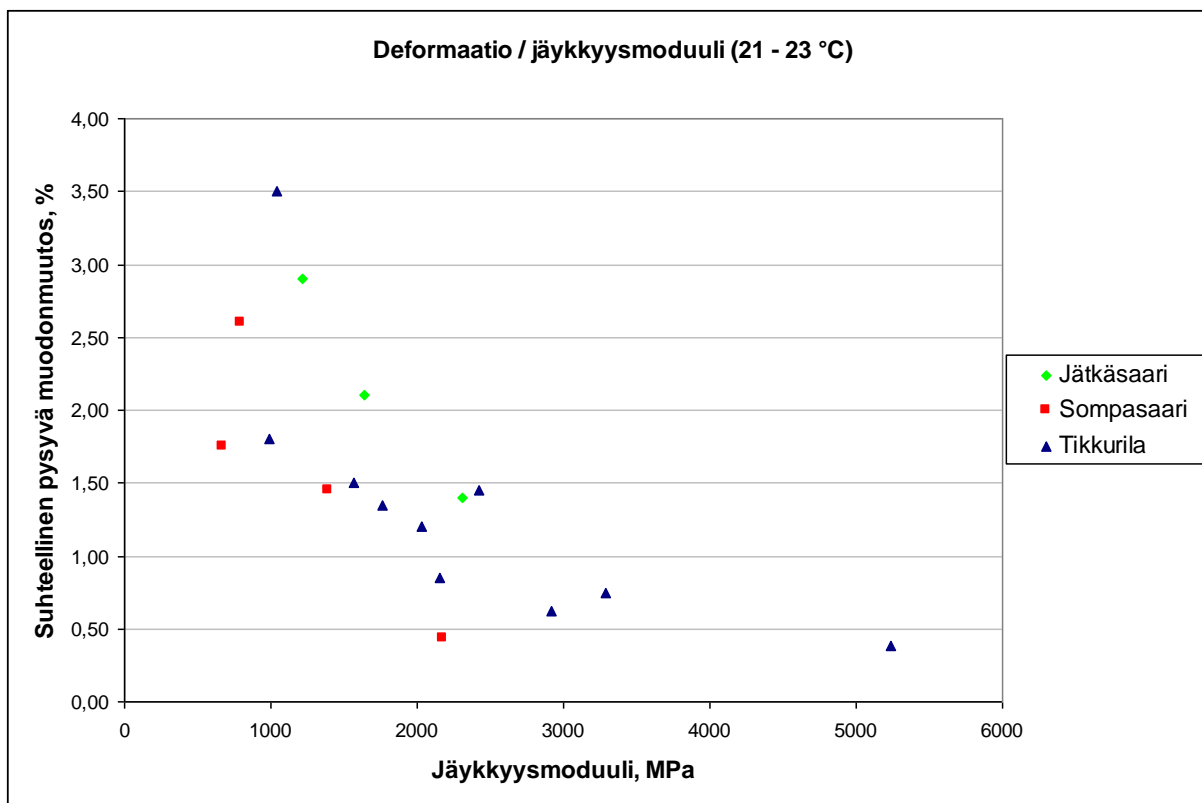


Kuva 61. Jaksollisen virumiskokeen tulokset.

Taulukko 24. Yhteenveto jaksollisista virumiskokeista

| Koekohde                         | Suhteellinen pysyvä muodonmuutos [%] |              |
|----------------------------------|--------------------------------------|--------------|
|                                  | Keskiarvo                            | Keskihajonta |
| <b>Jätkäsaari, ylempi kerros</b> | <b>2,13</b>                          | 0,75         |
| <b>Sompasaari</b>                | <b>1,47</b>                          | 0,72         |
| <b>Tikkurila, kaikki</b>         | <b>1,34</b>                          | 0,88         |
| Piste 1                          | <b>0,98</b>                          | 0,32         |
| Piste 2                          | <b>1,43</b>                          | 0,11         |
| Piste 3                          | <b>1,33</b>                          | 0,67         |
| Piste 4, komposiittiasfaltti     | <b>0,50</b>                          | 0,17         |
| Piste 5                          | <b>2,48</b>                          | 1,45         |

Kuvassa 62 on esitetty jaksollisissa virumiskokeissa mitatut suhteelliset pysyvät muodonmuutokset korkeammassa testilämpötilassa mitattujen jäykkyysmoduulien funktiona. Virumiskokeiden tulokset korreloivat mitattujen jäykkyysmoduulien kanssa, mutta koekohteiden erilaisten asfalttimassojen takia kuvaan ei ole sovitettu regressiokäyrää.



Kuva 62. Koekappaleiden jäykkyysmoduulit korkeammassa testilämpötilassa ja suhteelliset pysyvät muodonmuutokset.

## 6.2. Kenttäkokeet ja suoralaskenta

### 6.2.1. Sitomattomien rakennekerrosten tutkimus

Sitomattomien rakennekerrosten tutkimus tehtiin Jätkäsaareen ja Tikkurilan linja-autoterminalin koekohteissa. Sompasaaren satamakentältä ei laitteiston puuttumisen takia ollut mahdollista ottaa näytettä. Jätkäsaaren kairaus tehtiin 9.6.2010 Helsingin kaupungin rakennusviraston geotekniikkayksikön kuvassa 63 esitetyllä autokairalla. Varsinaista putkinäytettä ei otettu, vaan rakennekerrosmateriaalit määritettiin kairausvastuksen perusteella. Rakennekerrosmateriaalit eri syvyyksillä 3,65 m asti on esitetty taulukossa 25. Rakennekerrokset sisälsivät hienomman maa-aineksen lisäksi myös suurempia kiviä. Keskellä ylempää soraisen hiekan kerrosta jouduttiin poraamaan halkaisijaltaan 300 mm kiven läpi ja silttisen hiekan kerroksessa 100 mm kiven läpi.



Kuva 63. Autokairaus Jätkäsaaren Saukonlaiturilla.

Taulukko 25. Jätkäsaaren kerrosmateriaalit autokairauksesta

| Rakennemateriaali   | Paksuus [mm] | Alapinnan syvyys [mm] |
|---------------------|--------------|-----------------------|
| (Asfalttipäällyste) | 310          | 310                   |
| Sorainen hiekka     | 1400         | 1710 (kivi 300 mm)    |
| Silttinen hiekka    | 500          | 2210 (kivi 100 mm)    |
| Sorainen hiekka     | 1150         | 3360                  |
| Hiekka              | 290          | 3650                  |

Tikkurilan linja-autoterminalista otettiin kuvassa 64 esitetty putkinäyte Vantaan kaupungin pohjatutkimusyksikön autokairalla 16.6.2010. Kairaus suoritettiin poranäytepisteen numero 4 kohdalta. Poranäytekohdassa päällystepaksuus oli putkinäytteen perusteella 230 mm, ja kohdassa oli otettujen poranäytteidenkin perusteella paksuin päällyste linja-autoterminalin alueella. Huomionarvoinen asia otetussa putkinäytteessä oli varsinaisen kantavan kerroksen lähes täydellinen puuttuminen sekä kerroksellinen rakenne, jossa vanha päällystekerros on jätetty rakennekerroksen sisään.





Kuva 64. Tikkurilan linja-autoterminaalista otettu putkinäyte.

## 6.2.2. Pudotuspainomittaukset

### Heavy Loadman FWD

Pudotuspainomittaukset Heavy Loadman FWD:llä tehtiin 28.5. - 2.6.2010 kaikissa koekohteissa. Jo mittausten aikana epäiltiin kyseisen pudotuspainolaitteen soveltuvuutta paksujen päällysterakenteiden kantavuuden mittaamiseen. Mitatut kantavuudet vaihtelivat heti Jätkäsaaren ensimmäisessä mittauskohteessa välillä 64 - 10 000 MPa ja yksittäisessä mittauskohdassa suurimmillaan välillä 144 - 10 000 MPa. Pudotusten rakennekerroksia tiivistävä vaikutus ei ollut myöskään millään tavalla varmennettavissa, koska yksittäisen pisteen kantavuuden ja pudotuskerran välillä ei ollut minkäänlaista selvää yhteyttä. Taulukossa 26 on esitetty yhteenveto kokonaan liitteessä K esitetyistä tuloksista. Kaikilla kentillä ei ollut mahdollista mitata kaikkia 36 pistettä ja Tikkurilassa pisteet jäivät liikenteen takia vain seitsemään. Joissakin pisteissä tehtiin varmuuden vuoksi yli kolme pudotusta. Ainoastaan mediaanit antavat jonkinlaisen kuvan kantavuuksista, mutta pudotuspainolaitteen soveltumattomuuden vuoksi niistä ei kannata tehdä tarkempia päätelmiä.

Taulukko 26. Yhteenveto Heavy Loadmanin mittauksista.

| Koekohde:         | Pisteet /<br>pudotukset<br>[kpl] | Kokonaiskantavuus |                    |                       |                         |
|-------------------|----------------------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------|
|                   |                                  | Mediaani<br>[MPa] | Keskiarvo<br>[MPa] | Keskihajonta<br>[MPa] | Variaatiokerroin<br>[%] |
| Jätkäsaari        | 36 / 135                         | 328               | 789,2              | 1594,9                | <b>202,1</b>            |
| Sompasaari        | 36 / 153                         | 276               | 632,6              | 1145,5                | <b>181,1</b>            |
| Tikkurila         | 7 / 30                           | 286               | 1017,9             | 2242,7                | <b>220,3</b>            |
| Vuosaari, kohde 1 | 35 / 153                         | 295               | 877,2              | 1617,6                | <b>184,4</b>            |
| Vuosaari, kohde 2 | 17 / 69                          | 266               | 508,2              | 776,2                 | <b>152,7</b>            |
| Maaliikennekeskus | 30 / 132                         | 436               | 1195,9             | 2097,2                | <b>175,4</b>            |
| Nihtisilta        | 33 / 120                         | 250               | 469,9              | 1110,1                | <b>236,3</b>            |
| Suomenoja         | 16 / 54                          | 223               | 424,6              | 945,5                 | <b>222,7</b>            |

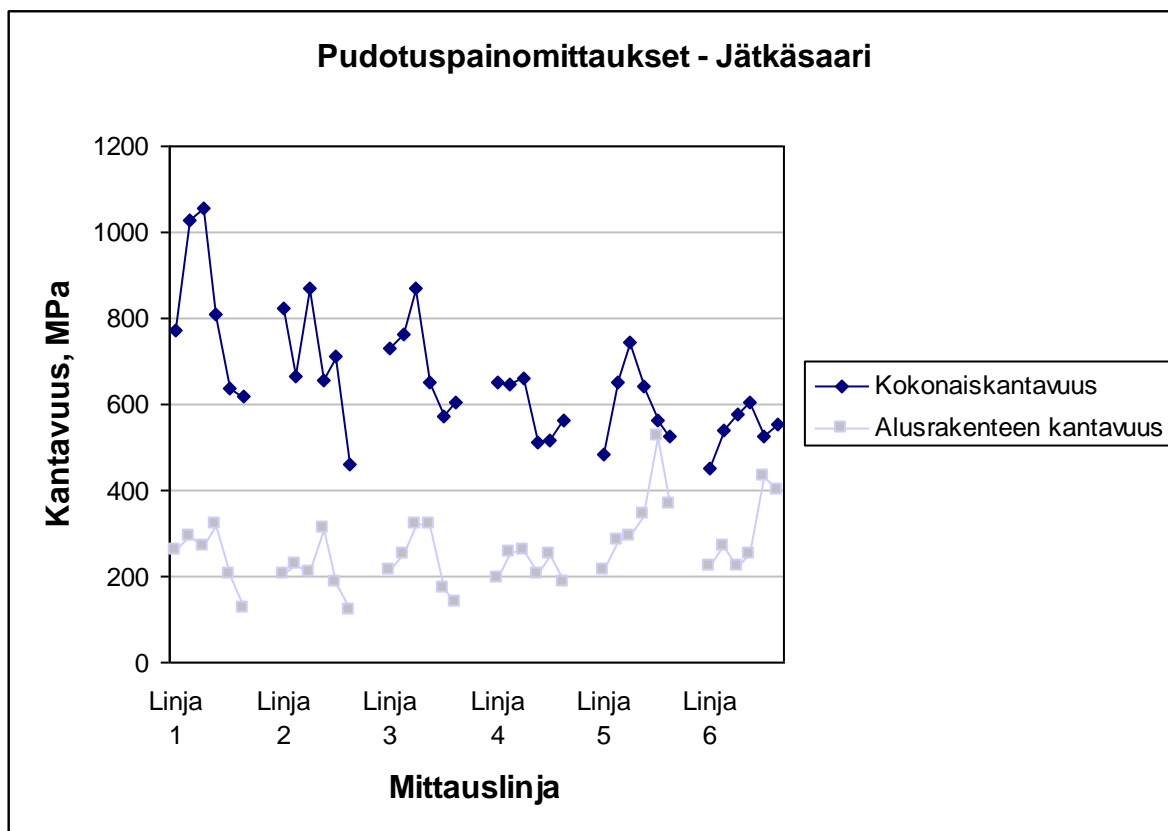
**KUAB FWD 50**

Pudotuspainomittaukset KUAB:illa tehtiin 18.6.2010, eikä niiden aikana havaittu mittausteknisesti mitään epätavallista. Taulukossa 27 sekä kuvissa 65 - 67 on esitetty mittausten tulokset. Kaikki tulokset ovat myös liitteessä L, jossa Jätkäsaaren ja Sompasaaren kantavuudet on merkitty koekenttiä kuvaaviin neliömatriiseihin. Sompasaaren suuret alusrakenteen kantavuudet johtuvat kalliopohjasta.. Liitteessä C.5 esitetyt Vuosaaren sataman kantavuudet olivat välillä 265 - 565 MPa, joten niihin verrattuna sekä Jätkäsaaren että Sompasaaren kantavuusarvot olivat korkeita. Tikkurilan linja-autoterminalissa kokonaiskantavuudet olivat muuten riittäviä, mutta mittauslinjan 4 kantavuudet jäivät alle rakennemitoituksessa käytetyn katuluokan 3 kantavuusvaatimuksen 352 MPa (SKTY, 2003).

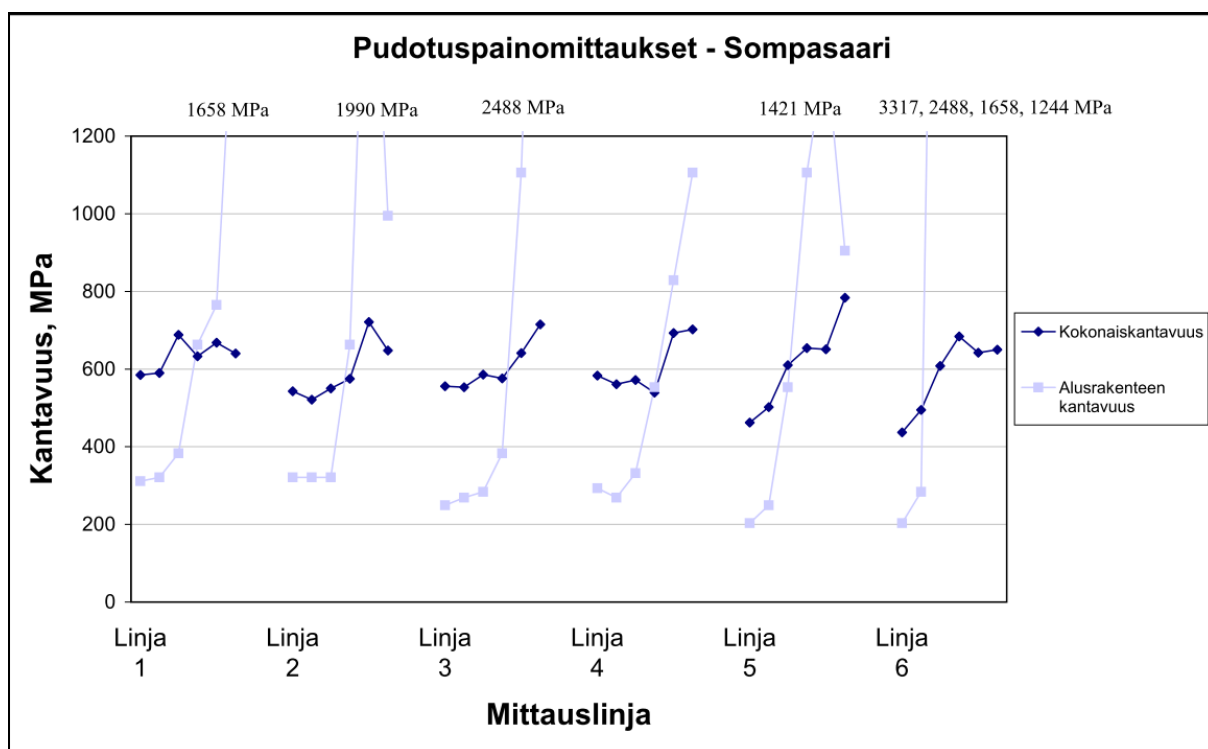
Taulukko 27. Yhteenveto KUAB-pudotuspainomittauksista

| Koekohde:         | Kokonaiskantavuus (E2)       |                    |                       |                      |
|-------------------|------------------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|
|                   | Mediaani<br>[MPa]            | Keskiarvo<br>[MPa] | Keskihajonta<br>[MPa] | Variaatiokerroin [%] |
| <b>Jätkäsaari</b> | 645,5                        | <b>658,2</b>       | 144,3                 | 21,9                 |
| <b>Sompasaari</b> | 599,0                        | <b>606,1</b>       | 76,7                  | 12,7                 |
| <b>Tikkurila</b>  | 495,0                        | <b>493,5</b>       | 81,1                  | 16,4                 |
| Linja 1           | 534,0                        | <b>536,6</b>       | 60,9                  | 11,3                 |
| Linja 2           | 463,0                        | <b>480,8</b>       | 37,6                  | 7,8                  |
| Linja 3           | 458,0                        | <b>467,2</b>       | 75,5                  | 16,2                 |
| Linja 4           | 342,5                        | <b>330,5</b>       | 28,0                  | 8,5                  |
| Koekohde:         | Alusrakenteen kantavuus (E2) |                    |                       |                      |
|                   | Mediaani<br>[MPa]            | Keskiarvo<br>[MPa] | Keskihajonta<br>[MPa] | Variaatiokerroin [%] |
| <b>Jätkäsaari</b> | 249,0                        | <b>258,8</b>       | 84,5                  | 32,7                 |
| <b>Sompasaari</b> | 553,0                        | <b>847,3</b>       | 761,8                 | 89,9                 |
| <b>Tikkurila</b>  | 163,0                        | <b>178,1</b>       | 39,2                  | 22,0                 |
| Linja 1           | 191,5                        | <b>200,4</b>       | 39,5                  | 19,7                 |
| Linja 2           | 163,0                        | <b>164,2</b>       | 22,5                  | 13,7                 |
| Linja 3           | 153,5                        | <b>151,0</b>       | 11,4                  | 7,5                  |
| Linja 4           | 136,0                        | <b>134,8</b>       | 19,2                  | 14,2                 |

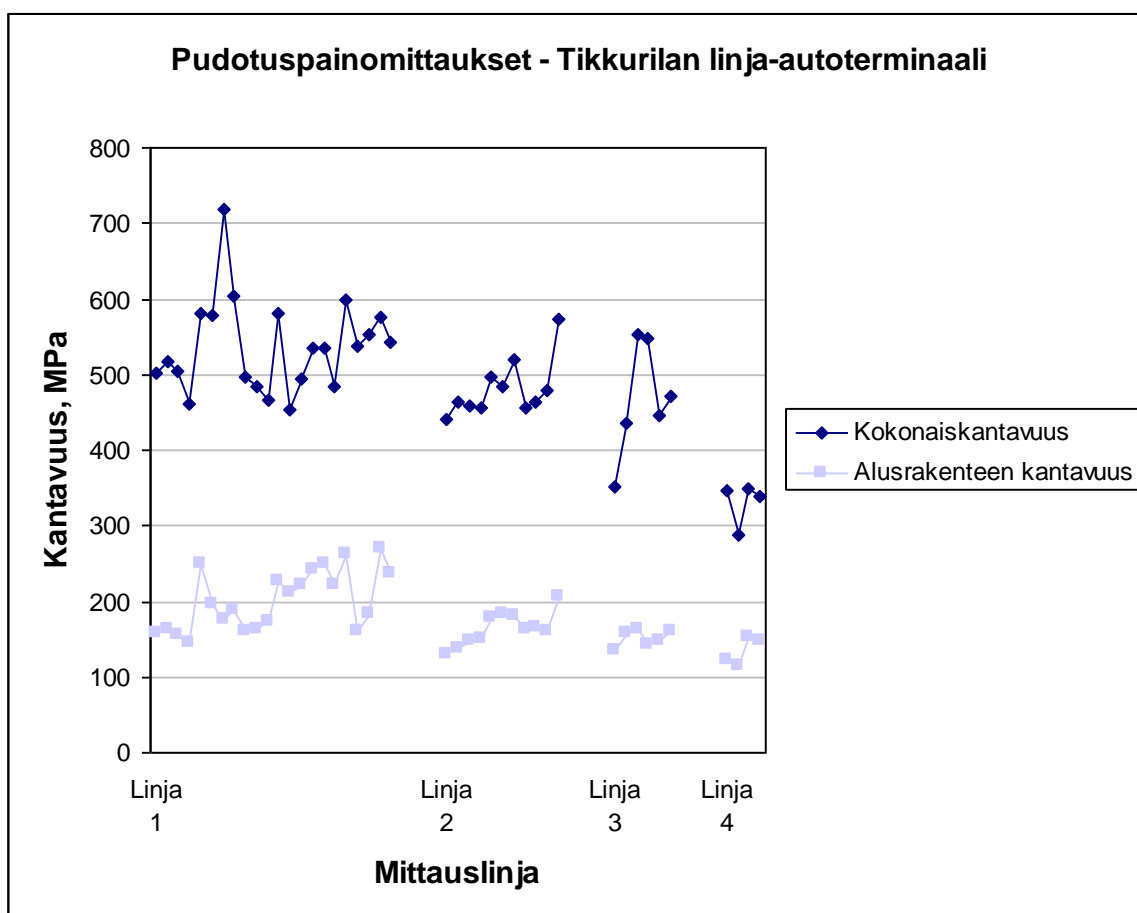




Kuva 65. Jätkäsaaren pudotuspainomittausten tulokset.



Kuva 66. Sompasaaren pudotuspainomittausten tulokset.



Kuva 67. Tikkurilan linja-autotermiinaalin pudotuspainomittauksten tulokset.

### 6.2.3. Maatutkamittaus ja suoralaskenta

Maatutkamittaus tehtiin 28.6.2010 Jätkäsaaren ja Sompasaaren koekohteissa koko koekentän kattavasti ja Tikkurilan linja-autotermiinaalissa seitsemänä linjana. Tätä tutkimusta varten tulkittiin kuitenkin vain pudotuspainomittauslinjoja vastaavat maatutkauslinjat. Maatutkausaineisto on esitetty liitteessä M. Aineistossa on esitetty

- maatutkauksen heijastumakuvat ja rakennekerrosrajojen tulkinnat
- pudotuspainomittauksten taipumasuppilot
- suoralaskennalla määritetyt jäykkyysmoduulit
- kokonaiskantavuudet (E2) ja Odemarkin laskennalliset kantavuudet
- päällysteen kuntoa kuvaava indeksi SCI (surface curvature index)
- pohjamaan kuntoa kuvaava indeksi BCI (base curvature index).

Tikkurilan linja-autotermiinaalin maatutkausaineistossa on esitetty myös mittauslinjan poikkileikkausprofiili valitusta kohdasta, mutta siinä ei ole esitetty rakennekerrosrajoja. SCI- ja BCI-indeksejä ei ole tässä tutkimuksessa käsitelty, koska niitä käytetään päällystettyjen tierakenteiden mitoituksessa harvoin ja niiden ohjearvot on annettu vain tavalliselle liikennekuormitukselle (Pihlajamäki, 2010).

Taulukossa 28 on esitetty yhteenveto suoralaskentatuloksista. Myös suoralaskentatulosten perusteella voidaan päätellä, että Tikkurilan linja-autoterminalissa päällyste on jäykempää kuin Jätkäsaarella ja Sompasaarella. Lisäksi laskennoissa käytettiin 12 000 MPa ylärajaa laskennalliselle päällysteen jäykkyysmoduulille, joten laskennallinen moduuli olisi useissa pudotuspisteissä ylittänyt tuon ylärajan. Linja-autoterminalin mittaustulosten 1 paalun 106 selvästi poikkeavat päällystejäykkyydet johtuvat luultavasti rakenteen alla olevista telekaapeleista. Paalujen 81 ja 96 välinen osa jätettiin mittaamatta, koska paalulta 85 mitattu ensimmäinen taipumasuppilo oli samanlainen kuin paalun 106 vastaava.

Taulukko 28. Suoralaskentatulosten yhteenveto

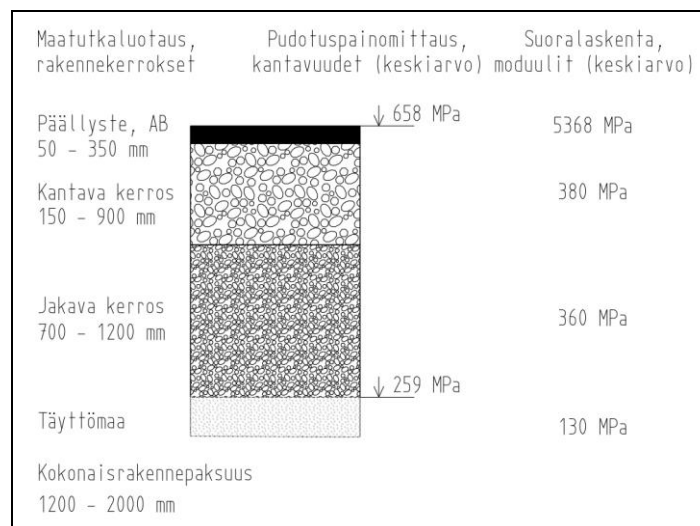
| Koekohde                              | Suoralaskettu jäykkyysmoduuli |          |              | Variaatiokerroin |
|---------------------------------------|-------------------------------|----------|--------------|------------------|
|                                       | Keskiarvo                     | Mediaani | Keskihajonta |                  |
| <b>Jätkäsaari</b>                     | [MPa]                         | [MPa]    | [MPa]        | [%]              |
| Päällyste                             | <b>5368</b>                   | 4196     | 3391         | 63,2             |
| Kantava kerros                        | <b>380</b>                    | 385      | 87           | 22,8             |
| Jakava kerros                         | <b>360</b>                    | 299      | 223          | 61,8             |
| Pohjamaa                              | <b>130</b>                    | 126      | 29           | 22               |
| <b>Sompasaari</b>                     |                               |          |              |                  |
| Päällyste                             | <b>5692</b>                   | 5136     | 2673         | 47               |
| Kantava kerros                        | <b>519</b>                    | 498      | 124          | 23,8             |
| Pohjamaa                              | <b>184</b>                    | 184      | 44           | 23,8             |
| <b>Tikkurilan linja-autoterminali</b> |                               |          |              |                  |
| Päällyste                             | <b>9014</b>                   | 9241     | 2898         | 32,1             |
| Kantava kerros                        | <b>281</b>                    | 276      | 51           | 18,3             |
| Jakava kerros                         | <b>347</b>                    | 344      | 65           | 18,7             |
| Pohjamaa                              | <b>101</b>                    | 98       | 21           | 20,3             |

Päällysteen jäykkyysmoduuleissa oli kaikissa kohteissa suurin hajonta, mikä johtuu päällystepaksuuden suurista vaihteluista erityisesti Jätkäsaarella. Lisäksi Jätkäsaarella päällyste koostui useasta eri kerroksesta ja asfalttimassasta, mikä lisää epävarmuutta laskentaan. Myös Jätkäsaaren jakavan kerroksen jäykkyysmoduulien hajonta oli suuri, minkä katsottiin johtuvan sataman epämääräisistä täyttökerroksista ja mahdollisista stabiloinneista. Hajonta oli muuten kuitenkin vähäistä. Pudotuspainomittausten perusteella lasketut päällysteen jäykkyysmoduulit eivät ole suoraan vertailukelpoisia laboratoriomittausten kanssa, koska pudotuspainomittauksissa kuormitusaika on lyhyempi kuin laboratoriokeksessa.

### Jätkäsaari

Jätkäsaarella maatumkaustulkintoja vaikeuttivat etenkin asfalttipäällysteen paksuuden suuri vaihtelu sekä epämääräiset rakennekerrokset. Meren pinta oli mittaushetkellä noin 2800 mm mittauskentän pintaa alempana, joten sillä ei ollut negatiivista vaikutusta tehtyihin tulkintoihin. Jätkäsaaren pohjavedenpinnan tason on todettu noudattavan pitkälti meren pinnan tasoa. Maatumkausaineiston perusteella mittauskentän päällysrakennepaksuudet

vaihtelivat välillä 50 - 350 mm. Päälystettä on selvästi lisätty painumien korjaamiseksi. Suurimmat kokonaiskantavuudet mitattiin kohdista, joissa päälystepaksuus oli maatutkaustulkinnan perusteella suurin. Päälystepaksuus oli suurempi mittauskentän meren puoleisella osalla ja vastaavasti ohuempi entisen portaalnosturin kiskon läheisyydessä vastakkaisella sivulla. Jätkäsaaren maatutkaustulkinnoina ei ole otettu kantaa kantavan kerroksen laatuun, ja ainakin joissain kohdissa se voi olla myös stabiloitu. Porakappaleet otettiin mittausrinjan 2 alkuosasta, joten ainakin siinä kohdassa maatutkaustulkinnan oikeellisuus päälystepaksuuden osalta voidaan vahvistaa. Jätkäsaaren satama on rakennettu lähes täysin täyttömaan päälle, mistä syystä myös mitatut alusrakenteen kantavuudet vaihtelevat suuresti. Maatutkausaineistosta voitiin lisäksi havaita tiiviydeltään erilaisia rakennekerroksia sekä mahdollisesti myös stabilointeja, jotka luonnollisesti vaikuttavat myös kantavuusarvoihin. Kuvassa 68 on esitetty Jätkäsaaren tulkitut rakennekerrokset, kantavuudet ja laskennalliset jäykkyysmoduulit.

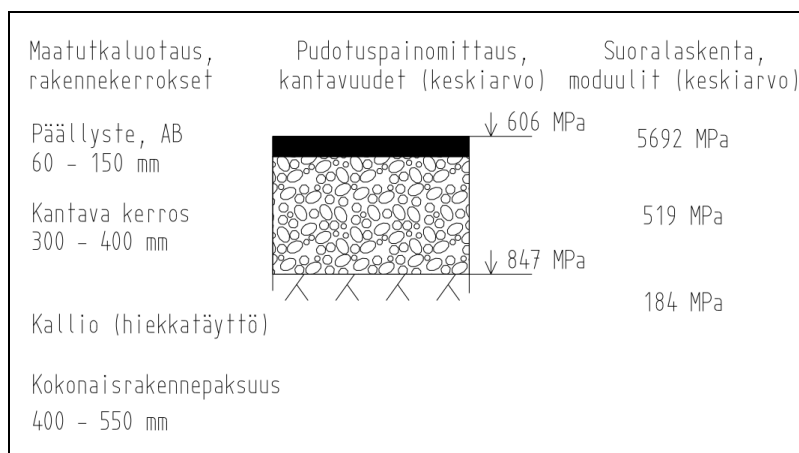


Kuva 68. Jätkäsaaren Saukonlaiturin rakennekerrokset, kantavuudet ja laskennalliset jäykkyysmoduulit.

## Sompasaari

Sompasaarella rakennekerrokset olivat yksinkertaisempia eikä epämääräisiä rajapintoja ollut, kuten Jätkäsaarella. Taipumasuppiloiden muoto ja mitatut pohjamaan kantavuudet viittasivat kuitenkin kallion pinnan läheisyyteen. Maatutkaustulkinnan perusteella varsinainen rakennekerrospaksuus on pääosin vain noin 0,5 m. Varmaa tulkintaa kallion rajapinnasta ei kuitenkaan pystytty tekemään. Maatutkausaineistosta havaittiin myös hiekkatäyttöjä kohdissa, joissa kallion pinta putoaa syvemmälle. Ne selittävät luonnollisesti myös pienemmät alusrakenteen kantavuusarvot. Joka tapauksessa Sompasaaren satamakentällä mitatut alusrakenteen kantavuudet olivat korkeampia kuin kahdessa muussa mittauskohdassa. Päälystepaksuus vaihteli välillä 60 - 150 mm. Päälysteen alapuolinen kantava kerros on tehty usein suoraan kallion päälle. Mitatut kokonaiskantavuudet kasvavat alusrakenteen kantavuuden kasvaessa tiettyyn rajaan saakka, minkä jälkeen kokonaiskantavuudet tasaantuvat huolimatta alusrakenteen kantavuuden kasvusta. Alusrakenteen kantavuudella on Sompasaarella siis selvä vaikutus kokonaiskantavuuteen, koska rakennekerrokset ovat ohuita.

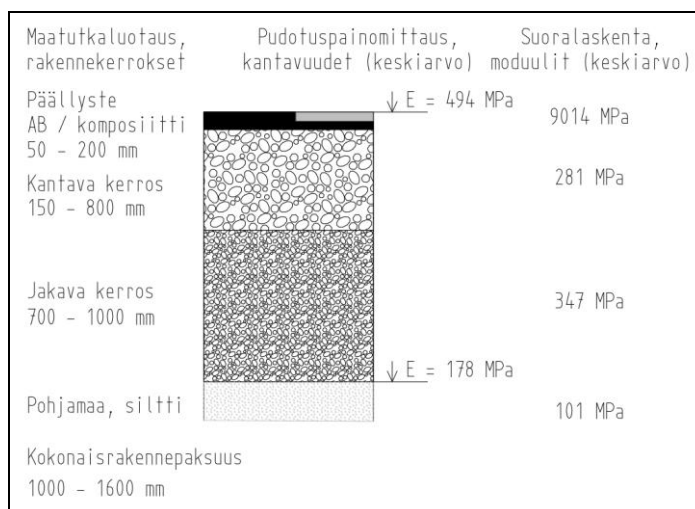
Vastaavasti Jätkäsaarella kokonaiskantavuuden ja alusrakenteen kantavuuden välillä ei ollut havaittavissa selvää yhteyttä. Kuvassa 69 on esitetty Sompasaaren tulkitut rakennekerrokset, kantavuudet ja laskennalliset jäykkyysmoduulit.



Kuva 69. Sompasaaren satamakentän rakennekerrokset, kantavuudet ja laskennalliset jäykkyysmoduulit.

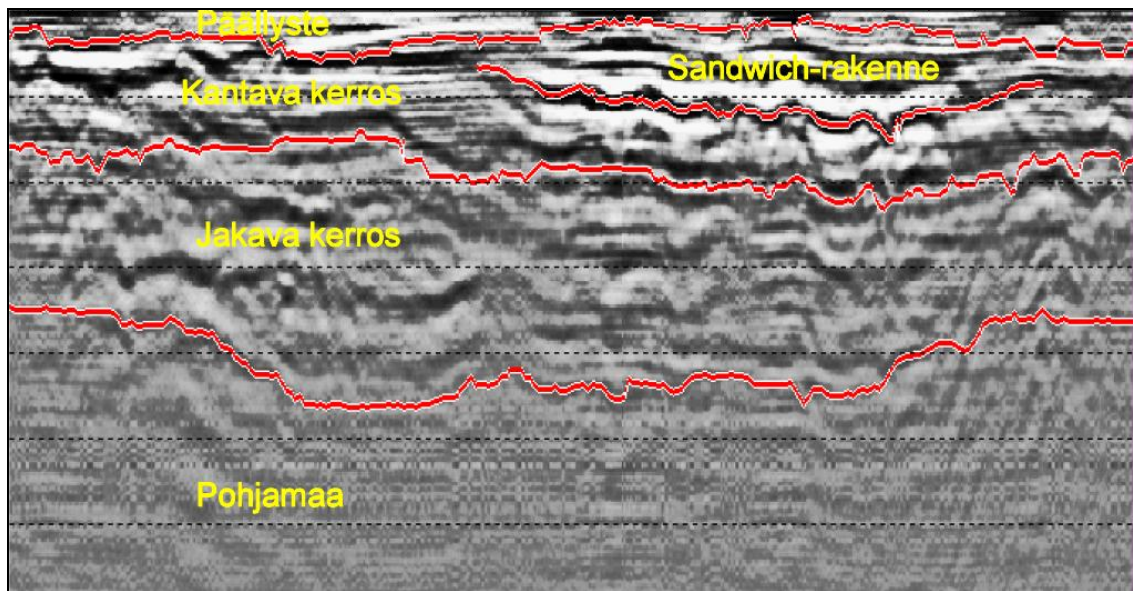
### Tikkurilan linja-autoterminaali

Tikkurilan linja-autoterminaalissa rakennekerrokset muistuttivat enemmän perinteisiä tierakentamisen rakennekerroksia. Pohjamaa koostuu Vantaan kaupungin tulkin mukaan silttikerroksesta, jonka alla on savea. Päällystepaksuudet vaihtelivat maatutkaustulkinnan mukaan välillä 50 - 200 mm, kuten oli havaittu myös poranäytepisteistä. Maatutkaustulkinnan perusteella havaittiin ainakin jonkinlainen kantava kerros sekä jakava kerros, jonka alapinta on pääasiassa noin 1,2 m syvyydellä. Mittauslinjojen 3 ja 4 kohdalla rakennekerrokset ovat selvästi painuneet ja kokonaisrakennepaksuus on jopa 1,6 m. Näissä kohdissa kantavan kerroksen paksuus on suurempi kuin muissa linja-autoterminaalien osissa. Kuvassa 70 on esitetty Tikkurilan linja-autoterminaalien tulkitut rakennekerrokset, kantavuudet ja laskennalliset jäykkyysmoduulit.



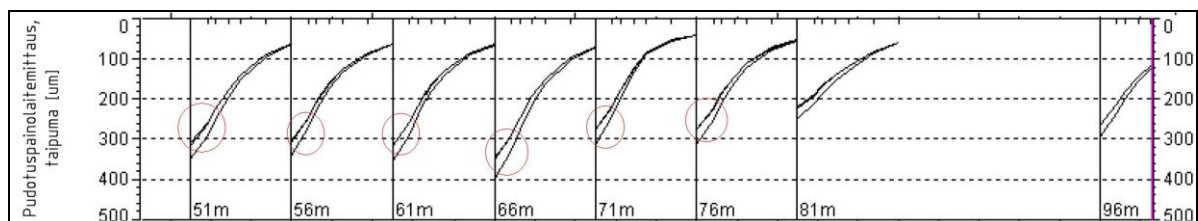
Kuva 70. Tikkurilan linja-autoterminaalien rakennekerrokset, kantavuudet ja laskennalliset jäykkyysmoduulit.

Kuvassa 71 esitetystä maatutkauslinjan numero 3 heijastumasta voitiin selvästi havaita uuden päällystekerroksen alle jätetty vanha päällyste. Rakenteen sisässä oleva päällystekerros ei läpäise vettä, joten varsinainen kantava kerros on erityisesti keväisin veden kyllästämä. Tällainen kerroksellinen rakenne ei näy pudotuspainolaitteen mittaamissa kantavuuksissa rakenteen ollessa kuiva. Kerroksellinen rakenne aiheuttaa kuitenkin keväisin deformaatio-ongelmia koko rakenteeseen eikä pelkästään päällysteeseen, mikä selittää mittauslinjojen 3 ja 4 rakennekerrosten painumisen.



Kuva 71. Kerroksellinen rakenne maatutkauslinjalla 3.

Taipumasuppiloiden muodon perusteella tehtiin lisäksi päätelmät kantavan kerroksen laadusta lähes koko linja-autotermiinalin alueella. Roadscanners Oy:n toimitusjohtaja FT Saarenkedon (2010) mukaan kuvassa 72 näkyvä taipumasuppiloiden alaosa loiveneminen viittaa heikkoon kantavaan kerrokseen. Kuvassa näkyvät taipumasuppilot ovat mittauslinjan 1 alusta. Tehty päätelmä tukee rakennekerroksesta otetun putkinäytteen perusteella tehtyä havaintoa, jonka mukaan varsinaista kantavaa kerrosta ei ole ollenkaan.



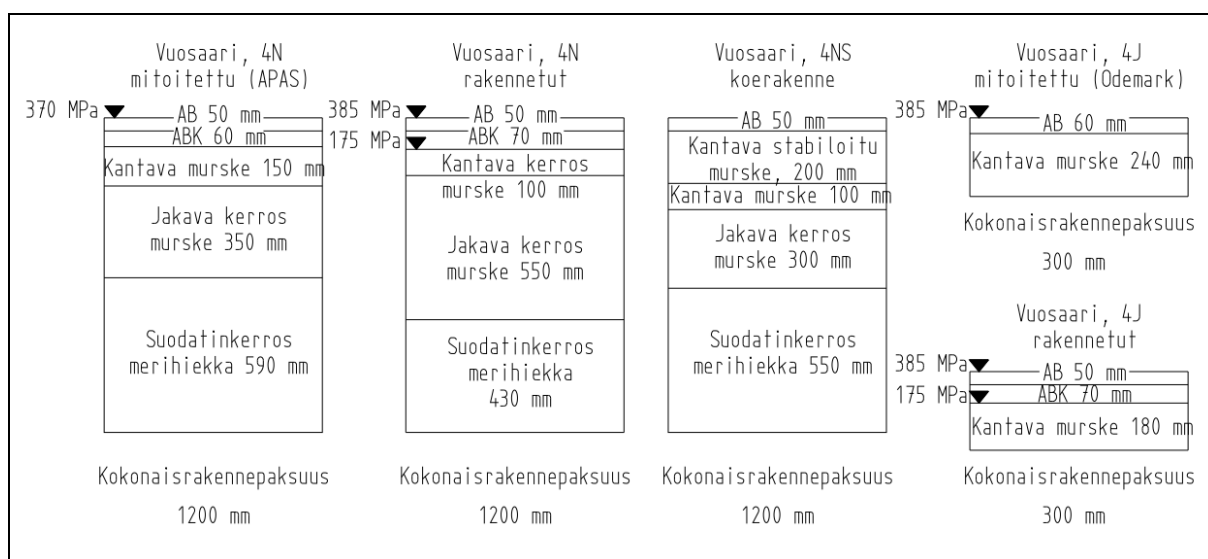
Kuva 72. Taipumasuppilot Tikkurilan linja-autotermiinalin mittauslinjan 1 alusta.

Heikko kantava kerros tai sen täydellinen puuttuminen selittää myös linja-autotermiinalin joissakin osissa käytetyn komposiittiasfaltin kanssa ilmenneitä ongelmia. Heikko alusta joustaa päällysteen alla ja synnyttää sidotun kerroksen alapintaan normaalia suurempia vetojännityksiä, joita tavallista asfalttipäällystettä jäykempi komposiittipäällyste ei kestä. Alapinnan pettäessä myös komposiittipäällysteen väsymiskestävyys heikkenee.

## 7. VUOSAAREN SATAMAN RAKENNEKERROKSIEN VAIHTOEHTOINEN MITOITUS

### 7.1. Mitoitusmenetelmät

Mitoituksessa käytettiin Interpaven, CBI:n ja Asphalt Instituten mitoitusmenetelmiä sekä APAS:ia. Mitoitus tehtiin Vuosaaren sataman kuormituskertalukuryhmän 4:n mukaisille rakenteille, joihin kuuluivat Vuosaaren sataman molemmat koekohteet. Mitoitustuloksia verrattiin toisiinsa sekä Vuosaaren mitoitettuihin ja toteutuneisiin rakennekerroksiin, jotka on esitetty kuvassa 73. Kuvassa on esitetty myös stabiloidun koerakenteen rakennekerrokset sekä kantavuusvaatimukset kantavan kerroksen päältä ja laskennalliset kokonaiskantavuudet. Alusrakenteen mitoituskantavuuksina käytettiin Vuosaaren sataman mitoituskantavuuksia 50 ja 280 MPa. APAS-mitoitus tehtiin ainoastaan konttikuormitukselle 50 MPa:n pohjamaan kantavuudella, ja mitoituskriteerinä käytettiin CBI:n ohjeen (Silfwerbrand, 2005) mukaista 2400  $\mu$ s suurinta sallittua pystysuuntaista puristusmuodonmuutosta pohjamaan pinnalla. APAS-mitoituksessa käytettiin CBI:n ohjeen mukaisia staattisten jäykkyysmoduulien arvoja. APAS:illa mitoitettujen rakenteiden kantavuudet laskettiin myös Odemarkin menetelmällä. Mitoitus oli tarkoitus tehdä myös Asphalt Instituten SW-1 -ohjelmalla ja HIPAVE:lla. SW-1 -ohjelman kokeiluversion asennustiedostossa oli kuitenkin puutteita, eikä ohjelman asennus lopulta onnistunut. HIPAVE:n kokeiluversio antoi toistuvia virheilmoituksia, minkä lisäksi rakennekerrospaksuus oli kokeiluversiossa rajoitettu yhteen metriin.



Kuva 73. Kuormituskertalukuryhmän 4 mitoitettut ja toteutuneet rakennekerrokset sekä kantavuusvaatimukset kantavan kerroksen päältä ja laskennalliset kokonaiskantavuudet.

Mitoituksessa käytetyt rakennekerrosvaihtoehdot ja niiden nimeämistapa on esitetty taulukossa 29. Interpaven menetelmällä mitoitettiin myös vaihtoehtoinen rakenne, jossa maabetonikerros muutettiin kalliomurskeeksi mitoitusohjeen (Interpave, 2007) vastaavuuskertoimella 3,0. APAS-laskennassa lähtökohtaisena rakenteena käytettiin Vuosaaren sataman mitoitustulosta 4N-rakenteelle.



Taulukko 29. Mitoituksen rakennekerrosmateriaalit. Mitoitettu rakennekerros on lihavoitu

| Mitoitusmenetelmä / rakennevaihtoehto | Päällyste             | Kantava kerros                        | Jakava kerros       | Suodatinkerros    |
|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------|-------------------|
| Asphalt Institute                     | <b>Asfalttibetoni</b> | -                                     | -                   | -                 |
| Interpave, 1                          | Betonikivi            | <b>Maabetoni</b>                      | Kalliomurske        | -                 |
| Interpave, 2                          | Betonikivi            | <b>Kalliomurske</b>                   | Kalliomurske        | -                 |
| CBI, 1                                | Betonikivi            | Kalliomurske                          | <b>Kalliomurske</b> | -                 |
| CBI, 2                                | Betonikivi            | Asfalttibetoni ja kalliomurske        | <b>Kalliomurske</b> | -                 |
| CBI, 3                                | Betonikivi            | Kalliomurske                          | <b>Betonimurske</b> | -                 |
| Vuosaari / APAS                       | <b>Asfalttibetoni</b> | <b>Asfalttibetoni ja kalliomurske</b> | <b>Kalliomurske</b> | <b>Merihiekka</b> |

## 7.2. Mitoituskuormat

Mitoitusajoneuvona käytettiin vastapainotrukkia, koska se oli ainoa kaikissa mitoitusmenetelmissä esiintyvä mitoitusajoneuvo. Mitoituskuormina käytettiin Vuosaaren sataman mitoituksessa käytettyjä 49,5 ja 18 t massoja trukille ja kontille. Renkaiden leveys ja keskeltä-keskelle -välit määräytyivät CBI:n mitoitusohjeessa käytetyn ja kuvassa 74 esitetyn trukin mittojen (Svetruck, 2007) perusteella. CBI:n mitoitusohjeen 90 t mitoitusakseli on määritetty ilmeisesti trukin 42 t maksiminostokapasiteetin (Svetruck, 2007) mukaan, mikä on yli kaksinkertainen verrattuna Vuosaaren 18 t mitoituskonttikuormaun. Tämän takia mitoitus tehtiin myös CBI:n mitoitusohjeen pyöräkuormaimen 30 t mitoitusakselilla, joka vastaa paremmin Vuosaaren sataman mitoitusakselia. Interpaven mitoitusmenetelmässä käytettiin Vuosaaren sataman mitoituksessa käytettyä vakioarvoa 1,15 dynaamiselle kuormituslisälle.



Kuva 74. Mitoituksessa käytetty vastapainotrukki Svetruck 42120-57 (Nettikone, 6.4.2011).



Mitoitusliikennemäärät laskettiin Vuosaaren sataman kuormituskertalukuryhmä 4:lle käytetyn kuormituskertaluvun perusteella. Konttikuormina käytettiin Interpaven mitoitusohjeen mukaisia taulukossa 7 esitettyjä arvoja ja CBI:n mitoitusohjeen taulukossa 9 esitettyjä kuormituspaineita. Yhteenveto vaihtoehtoisissa mitoituksessa käytetyistä mitoituskuormista ja kuormituspainesta on esitetty taulukossa 30.

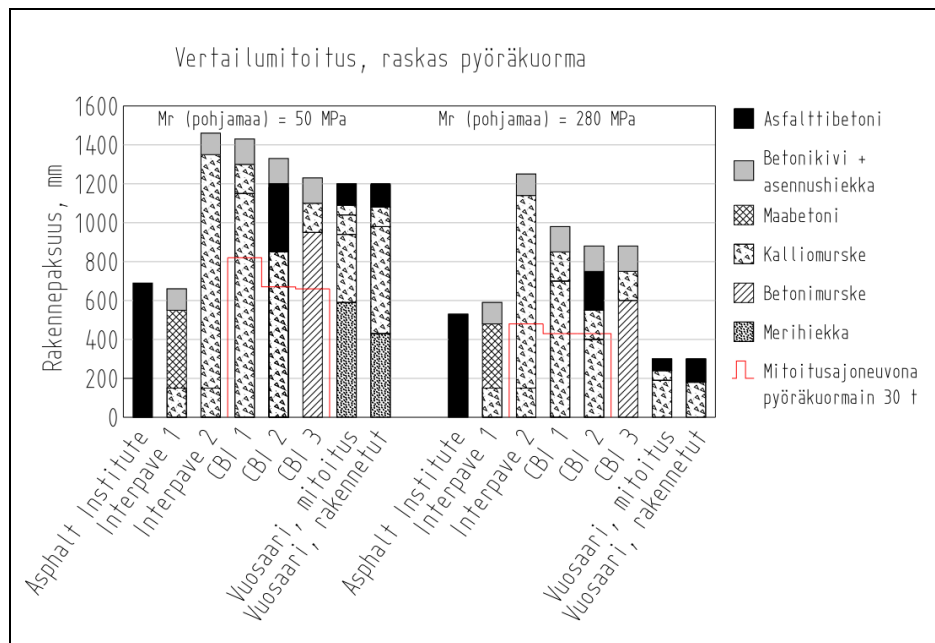
Taulukko 30. Mitoituksessa käytetyt mitoituskuormat ja kuormituspainet

|                    | Asphalt Institute   | Interpave   | CBI   | APAS  |
|--------------------|---|---|---|---|
| Raskas pyöräkuorma | Vastapainotrukki<br>67,5 t = 662 kN<br>(49,5 t + 18 t)<br><b>0,94 MPa</b> | Vastapainotrukki<br>67,5 t = 662 kN<br>(49,5 t + 18 t)<br><b>0,94 MPa</b>   | Vastapainotrukki<br>90 t = 883 kN<br><br>Pyöräkuormain<br>30 t = 294 kN | -   |
| Kontti-kuormat     | -   | 1 kontti - 76,2 kN<br><b>2,64 MPa</b><br>2 konttia - 137,2 kN<br><b>4,76 MPa</b><br>3 konttia - 182,9 kN<br><b>6,34 MPa</b> | <b>2,64 MPa</b><br><b>4,76 MPa</b><br><b>6,34 MPa</b>                   | <b>2,64 MPa</b><br><b>4,76 MPa</b><br><b>6,34 MPa</b> |

### 7.3. Mitoitustulokset

#### 7.3.1. Raskas pyöräkuorma

Kuvassa 75 on esitetty mitoituksen tuloksena lasketut kokonaisrakennepaksuudet vastapainotrukin mitoituskuormalla. Kuvaajaan on merkitty myös CBI:n mitoitusohjeen mukaiset kokonaisrakennepaksuudet pyöräkuormaimen 30 t mitoituskuormalle.



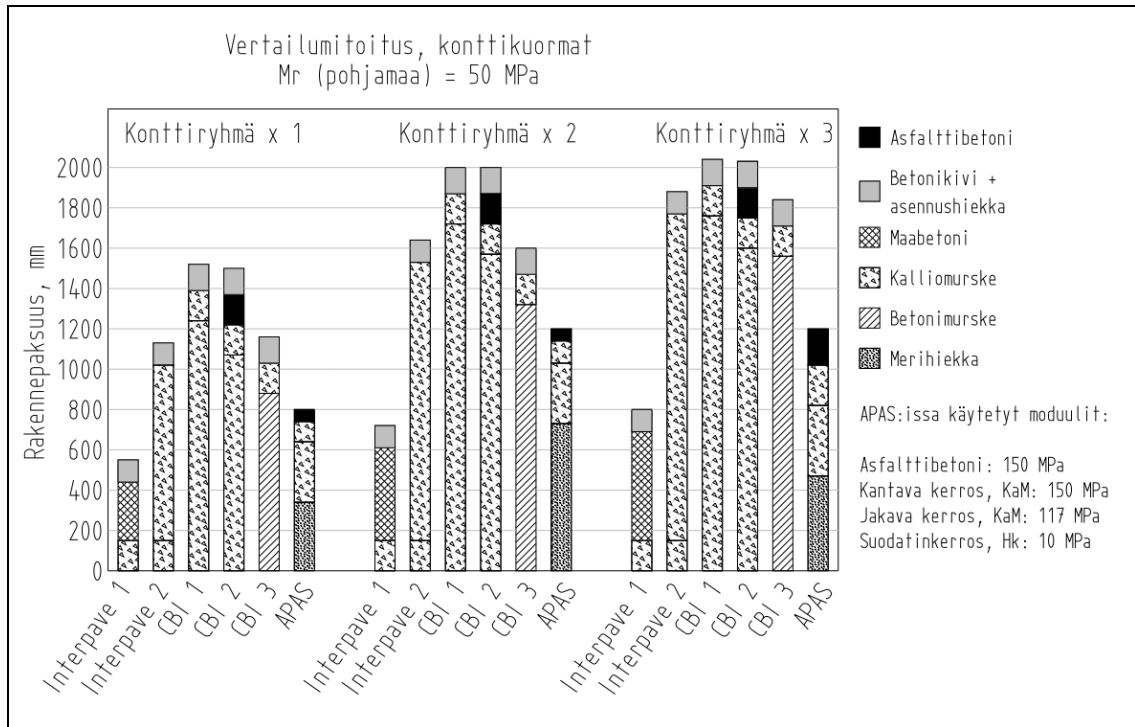
Kuva 75. Mitoituksen rakennekerrospaksuudet vastapainotrukin pyöräkuormalle.

Kokonaisrakennepaksuudet olivat pienimmät odotetusti Asphalt Instituten syväsfalttirakenteella ja Interpaven ensisijaisella rakenteella, jossa kantava kerros on maabetonia. Kokonaisrakennepaksuudet näille vaihtoehdoille olivat lähes samat ja erot yllättävän pieniä eri pohjamaaluokille mitoitettujen rakennekerroksien välillä. Interpaven vaihtoehtoiselle rakenteelle käytetty vastaavuuskerroin 3,0 maabetonin muuttamiseksi kalliomurskeeksi on huomattavan suuri, joten Interpaven vaihtoehtoista rakennetta voidaan pitää ylimitoitettuna verrattuna ensisijaiseen rakenteeseen. CBI:n mitoitustaulukoiden perusteella mitoitettut rakennekerrokset pohjamaan kantavuudella 50 MPa eivät eroa juurikaan Vuosaaren sataman rakennekerroksista. Toisaalta Vuosaaren sataman 1200 mm kokonaisrakennepaksuus määräytyi routamitoituksen perusteella, joka ei sisälly CBI:n mitoitukseen. Siten CBI:n vertailurakenteiden sitomattomia kerroksia voidaan pitää myös ylimitoitettuina verrattuna Vuosaaren sataman rakennekerroksiin. Itse CBI:n mitoitusmenetelmässä ylimitoitusta aiheuttavat jännitystilasta riippumattomat sitomattomien rakennekerrosten jäykkyysmoduulit. Mitoituksessa eroja syntyy lisäksi CBI:n vastapainotrukin 90 t mitoituskuormasta, joka on suurempi kuin muiden menetelmien mitoituskuormat. Vastapainotrukin kuormalle mitoitettut rakennekerrokset olivat lähes kaksinkertaiset verrattuna pyöräkuormaimen 30 t akselipainolle mitoitettuihin rakennekerroksiin.

Suurimmat erot vaihtoehtoisen mitoituksen rakennekerrosten ja Vuosaaren sataman rakennekerrosten välillä syntyivät kuitenkin kantavammalla pohjamaalla, jossa jopa Asphalt Instituten syväsfalttirakenne ja Interpaven maabetonirakenne olivat Vuosaaren sataman rakennekerroksia paksumpia. Erot johtuvat eri mitoitusmenetelmissä käytetyistä pohjamaan mitoituskantavuuksista sekä mitoitusmenetelmien tavasta ottaa kantavuus huomioon. Asphalt Instituten mitoituskuvaajassa suurinta kantavuutta vastaava apuviiva on 22 500 psi eli noin 155 MPa, joten  $T_{A/a}$ -arvot jouduttiin ekstrapoloimaan kantavammalla pohjamaalla. Interpaven menetelmässä tukikerros mitoitetaan kantavuuden perusteella alle 5 % pohjamaan CBR-arvoilla. Suuremmilla pohjamaan CBR-arvoilla kantavuus vaikuttaa ainoastaan mitoituskuormaan, koska sen perusteella määräytyy alustan tehollinen syvyys ja siten redusoidun pyöräkuorman laskentakerroin. Interpaven menetelmällä ero 50 MPa:n ja 280 MPa:n kantavuuksille mitoitettujen rakennekerrospaksuuksien välillä oli kuitenkin vain marginaalinen 70 mm. CBI:n mitoitusmenetelmässä suurin pohjamaan kantavuus on sen sijaan vain 150 MPa, joka on huomattavasti pienempi kuin muissa menetelmissä käytetty 280 MPa. Lisäksi kantavuusarvo 280 MPa ei kuvaa irtilouhitun kallion tai louhetäytön todellista kantavuutta, koska se on Odemarkin kantavuuslaskentaa varten määritetty laskennallinen arvo, jolla levykuormituslaitteella mitattu kantavuus vastaa laskennallista kantavuutta. Kaikki laskentatulokset ja yksityiskohtaiset mitoitustulokset on esitetty liitteessä N.

### 7.3.2. Konttikuormat

Kuvassa 76 on esitetty mitoituksen tuloksena lasketut rakennepaksuudet konttiryhmälle kolmella eri lastauskorkeudella pohjamaan kantavuudella 50 MPa.

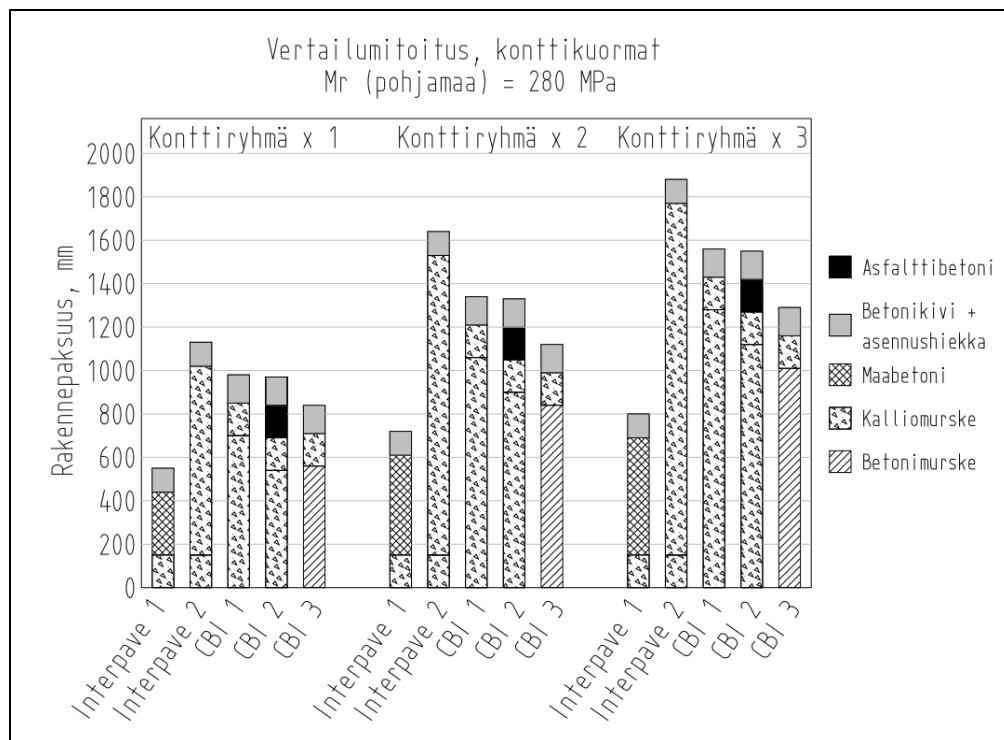


Kuva 76. Mitoituksen rakennekerrospaksuudet konttikuormille 50 MPa:n alusrakenteen kantavuudella.

Päinvastoin kuin raskaille pyöräkuormille tehdyssä vertailussa, konttikuormille tehdyssä vertailussa Interpaven vaihtoehtoiset rakennekerrokset ovat ohuempia kuin CBI:n mitoitusaulukoiden perusteella mitoitettujen rakennekerrosten. Kappaleessa 4.3.4 todettiin, että CBI:n mitoitusaulukoiden laskennassa kiinnitettiin huomiota rakennekerrospaksuuden kasvamiseen 2,0 m routasyvyyteen asti. Sama ilmiö on havaittavissa tehdyssä mitoituksessa, jossa CBI:n rakennevaihtoehtojen 1 ja 2 kokonaisrakennepaksuudet ovat tasan 2,0 m jo kahden kontin ryhmällä. Betonimurske jakavassa kerroksessa säästää kokonaisrakennepaksuudessa 200 - 400 mm, koska sen jäykkyysmoduulin kuormitusaikariippuvuus ei ole niin voimakas kuin kalliomurskeen. APAS:illa mitoitettujen rakennekerrosten olivat yllättävän ohuita verrattuna CBI:n ohjeen mukaisiin rakennekerroksiin, vaikka molemmissa menetelmissä on käytetty samoja staattisia jäykkyysmoduuleja. APAS-mitoituksessa päällyste oli asfalttibetonia, jolle käytettiin CBI:n mitoitusohjeen mukaista kantavan kerroksen asfalttibetonin staattista jäykkyysmoduulia 150 MPa. CBI:n mitoituksessa käytetyn betonikivipäällysteen staattinen jäykkyysmoduuli oli 2000 MPa ja asennushiekan 23 MPa. Kahden kontin ryhmälle mitoitettujen rakennekerrosten vastaavat pitkälti liitteessä C.4 esitettyä kuormituskertalukuryhmälle 5 mitoitettua rakennetta 5N ja kolmen kontin ryhmälle mitoitettujen rakennekerrosten kuormituskertalukuryhmälle 2 mitoitettua rakennetta 2N. Yhden ja kahden kontin ryhmälle mitoitettujen rakennekerrosten eivät

kuitenkaan täyttäneet kuvassa 73 esitettyä kantavuusvaatimusta kantavan kerroksen päältä eivätkä laskennallista kokonaiskantavuutta. Kaikki laskentatulokset ja yksityiskohtaiset mitoitustulokset on esitetty liitteessä N.

Kuvassa 77 on esitetty mitoituksen tuloksena lasketut rakennepaksuudet konttiryhmälle kolmella eri lastauskorkeudella pohjamaan kantavuudella 280 MPa. Interpaven menetelmällä mitoitettut rakennekerrokset vastaavat tarkalleen pehmeämmälle pohjamaalle mitoitettuja rakennekerroksia, koska redusoidun pyöräkuorman laskentakertoimet eivät vaikuta konttikuormiin. Tästä syystä suhde Interpaven ja CBI:n rakennekerrospaksuuksien välillä on käänteinen verrattuna kuvan 76 mitoitukseen 50 MPa pohjamaan kantavuudella. Kaikki laskentatulokset ja yksityiskohtaiset mitoitustulokset on esitetty liitteessä N.



Kuva 77. Mitoituksen rakennepaksuudet konttikuormille 280 MPa:n alusrakenteen kantavuudella.

## 8. POHDINTAA

### Mitoituskuormien ja kuormituskertojen määrän arviointi

Tutkimuksen lähtökohtaisia ongelmia olivat konteille käytettävien mitoituSKUORMIEN ja ajoneuvojen kuormituskertojen määrän arviointi. Tutkimuksessa käsitellyissä mitoituSMENETELMISSÄ ajoneuvojen mitoituSKUORMA määräytyy ajoneuvon oman kuorman ja konttikuorman perusteella. Kaikissa menetelmissä käytetään mitoituSKONTTIKUORMANA vajaata konttikuormaa lukuun ottamatta CBI:n mitoitusta vastapainotrukille, mikä tapahtuu trukin maksiminostokapasiteetin perusteella. Tämä tarkoittaa päällekkäisten konttien samanaikaista nostoa. CBI:n käyttämä 90 t vastapainotrukin mitoituSKUORMA on siis selvästi ylimitoitettu

verrattuna muiden mitoitusohjeiden vastaaviin. Ajoneuvokuormien laskennassa käytetyt konttikuormat on esitetty taulukossa 31. Lihavoitu arvo on esitetty mitoitusohjeessa, mistä kuorma tai prosenttiosuus laskettiin käyttämällä 20 jalan kontille maksimikuormaa 24 t ja 40 jalan kontille maksimikuormaa 30,2 t (Helsingin Konttikeskus Oy, 6.4.2011).

Taulukko 31. Ajoneuvokuormien laskennassa käytetyt konttikuormat ja kuorman prosenttiosuus maksimikonttikuormasta

| Konttikoko | Asphalt Institute<br>(suositus) | Interpave & HIPAVE<br>(suositus) | Betonginstitute<br>vastapainotrukki<br>(Svetruck AB) | Vuosaaren sataman<br>mitoitus |
|------------|---------------------------------|----------------------------------|--|-------------------------------|
| 20 jalkaa  | 14,4 t ( <b>60 %</b> )          | <b>20 t</b> (83 %)               | <b>42 t</b> (175 %)                                  | <b>17 t</b> (71 %)            |
| 40 jalkaa  | 18,1 t ( <b>60 %</b> )          | <b>22 t</b> (73 %)               | <b>42 t</b> (139 %)                                  | <b>22,5 t</b> (75 %)          |

Ajoneuvojen mitoituskuorman suuruus riippuu myös käytettävästä dynaamisesta kuormituslisästä, mikä määräytyy kiihdytysten, jarrutusten, kääntymisten ja mahdollisen epätasaisen pinnan aiheuttamasta kuormituksesta. Kappaleen 4.2.2 taulukossa 6 on esitetty Interpaven mitoitusohjeen mukaiset dynaamiset kuormituslisät eri tapauksissa. Paikkakohtaisten kuormituslisien arvojen käyttö on perusteltua lähinnä paikoissa, joissa mitoitusajoneuvojen tiedetään varmuudella kääntyvän jyrkästi. Kuormituslisän arvot ovat merkittäviä ainoastaan kääntymistapauksissa, minkä lisäksi kääntyessä kuormituslisä kohdistuu sekä etu- että takarenkaisiin. Interpaven ohjeen mukaan jarrutushetkellä kuormitus lisääntyy etupyörien osalta ja vähenee takapyörien osalta. Yleensä kääntymistilanteissa tapahtuu joka tapauksessa myös jarrutus ja kiihdytys. Vuosaaren sataman mitoituksessa käytettiin kaikille mitoitusajoneuvoille kuormituslisän vakioarvoa 1,15, joka vaikutti koko alueeseen. Asphalt Instituten mitoitusohjeessa kuormituslisää ei ole mainittu ollenkaan ja CBI:n mitoitusohjeessa on mainittu, että kuormituslisää ei ole otettu mitoituksessa huomioon ja asiaa pitää tarkastella erikseen. Erillisten mitoituskuormiin vaikuttavien kuormituslisien käyttö ei ole kuitenkaan täysin perusteltua, koska dynaaminen kuormituslisä on pääasiassa pintakerrokseen kohdistuvaa leikkausjännitystä. Dynaamiset kuormituslisäykset kannattaisi ottaa paikallisesti huomioon ennemminkin käyttämällä parempilaatuisia päällystemateriaaleja, minkä lisäksi voitaisiin käyttää Vuosaaren sataman mitoituksen vakiokuormituslisän kaltaista vakioarvoa.

Ajoneuvojen kuormituskertojen määrän arviointi on kenttäalueilla vaikeaa, koska liikenne jakautuu epätasaisesti koko kentän alueelle. Asphalt Instituten ja CBI:n mitoitusohjeissa mitoitus perustui ainoastaan yhteen valittavaan mitoitusajoneuvoon. Tämä asettaa rajoituksia mitoitusohjeiden käytölle, jos mitoitus täytyy tehdä useamman kuormitustyyppin perusteella. Myös Interpaven ohjeessa on sama ongelma, mutta mitoitusohjeen avulla voidaan kuitenkin laskea mitoituskuormat erikseen. Mitoitusohjeita käytettäessä pitää joko luottaa yhdelle kuormitustyyppille tehdyn mitoituksen riittävyyteen tai yhdistää mitoituskuormia keinoitekoisesti, kuten Vuosaaren sataman rakennekerroksien mitoituksessa tehtiin. Vuosaaren sataman mitoituksessa kuormituskertaluku laskettiin APAS:illa määritettyjen mitoitusajoneuvojen vastaavuuskertoimien perusteella. Vastaavuuskertoimien määrittäminen akselikuormien perusteella tierakennemitoituksessa käytetyllä neljänneksen potenssin säännöllä

olisi johtanut selvään ylimitoitukseen. Tässä tutkimuksessa käsitellyllä HIPAVE-mitoitusohjelmalla voidaan laskea vauriokertoimet erikseen eri ajoneuvoille sekä yhdistetty vauriokerroin. Ohjelma on tällä hetkellä kehittynein tietokoneohjelma raskaiden pyöräkuormien kuormituskokonaisuuksien käsittelyssä.

Konttien säilytysalueen rakennekerrosten mitoituksessa pitää ottaa yksittäisen kontin kuorman lisäksi huomioon konttipinon korkeus. Interpaven ja CBI:n mitoitusmenetelmissä konttipinon kuorman arviointi tapahtuu kappaleessa 4.2.3 esitetyn taulukon 7 mukaisesti. Samoja arvoja voidaan käyttää konttien säilytysalueiden rakennekerrosmitoitukseen myös Suomessa, jos erillistä tutkimusta konttipinojen korkeuksista ja kuormista ei tehdä. Taulukon mukaisten kuormitusarvojen käyttäminen aiheuttaa epävarmuutta vasta suuremmilla konttipinojen korkeuksilla, jolloin epävarmuutta alkaa esiintyä myös tulevien konttipinojen korkeuksien ennustamisessa.

### **Redusoidun pyöräkuorman teorian hyödyntäminen**

Vaihtoehtoista mitoitusta tehtäessä havaittiin, että Asphalt Institutin käyttämä redusoidun pyöräkuorman määrittystapa on turhan monimutkainen tässä tutkimuksessa käsitellyille mitoitusajoneuvoille. Kappaleen 4.1.4 kuvassa 23 esitettyjä teliratkaisuja käytetään lähinnä lentokoneissa. Tutkimuksen mitoitusajoneuvojen renkaiden keskeltä-keskelle -välit ovat joko liian pieniä tai liian suuria, että niillä olisi vaikutusta mitoitukseen. Mitoitusajoneuvoissa paripyörien keskeltä-keskelle -väli on niin pieni, että redusoitu pyöräkuorma vastaa lähes tarkalleen paripyörän kokonaiskuormaa. Mitoitusajoneuvojen akselien muut pyörät ovat taas niin kaukana ensisijaisesta mitoituspyörästä, ettei niitä tarvitse ottaa laskennassa huomioon. Interpaven menetelmässä käytetty redusoidun pyöräkuorman määrittystapa on paljon yksinkertaisempi, vaikka redusoidun pyöräkuorman laskentakertoimen määrittämiseen käytetty laskentakaava todettiin epävarmaksi pienillä keskeltä-keskelle -väleillä ja pehmeillä pohjamailla. Kappaleessa 4.2.2 esitetty taulukko 5 on kuitenkin riittävä laskentakertoimien ja redusoidun pyöräkuorman määrittämiseen.

### **Mitoituskriteerit**

Tutkimuksessa käsitellyt mitoitusohjeet ja -menetelmät perustuivat pääasiassa tierakennemitoituksessa käytettyihin mitoituskriteereihin tai niistä laskennallisesti raskaammille kuormille muutettuihin kriteereihin. Vuosaaren sataman irtilouhitun kallion varaan ja louhetäytille perustetut alueet mitoitettiin ainoastaan kantavuuden perusteella Odemarkin laskentakaavalla. Tässä tutkimuksessa mielenkiinto kohdistui erityisesti CBI:n mitoitusohjeessa käytettyyn konttikuormituksen mitoituskriteeriin, joka oli tierakennekerrosten mitoituksessa käytetty pohjamaan pinnan 2400  $\mu$ s pystysuuntainen puristusmuodonmuutos yksittäiskuormitukselle. Vastaavaa mitoituskriteeriä ei ole suomalaisissa tierakennemitoitusohjeissa (Tiehallinto, 2004). Staattisia konttikuormituksia ei voida laskea kuormituskertojen määrän perusteella, joten mitoituksen täytyy perustua yksittäiskuormaan.

Pitkäaikaiskuormitus otettiin huomioon käyttämällä pienempiä staattiseen kuormitukseen perustuvia jäykkyysmoduulien arvoja. Tässä tutkimuksessa ruotsalaista mitoituskriteeriä käytettiin APAS-laskennassa Vuosaaren sataman rakennekerroksien vaihtoehtoiseen mitoitukseen. Mitoituksen perusteella mitoituskriteeri on käyttökelpoinen pitkäaikaiskuormia varten tehtävässä rakennekerrosmitoituksessa, mutta käytettäviin materiaaliparametreihin liittyy vielä epävarmuutta. Lisäksi konttikuormituksille tehtävää rakennemitoitusta varten APAS-mitoituksen iteraatioprosessi täytyy miettiä huolellisesti. Joillekin rakennekerroksille kannattaa määrätä kiinteä paksuus, jota ei muuteta mitoituksen aikana. CBI:n mitoitusaulukoiden laskennassa mitoitettiin ainoastaan jakavaa kerrosta.

Ulkomaisista mitoitusohjeista ainoastaan CBI:n mitoitusohjeiden laadinnassa oli kiinnitetty huomiota rakennekerrosten pysyvien muodonmuutosten tärkeyteen. Kokonaisdeformaatiotarkastelu tehtiin konttikuormille ja mitoituskriteerinä käytettiin 2 mm:n sallittua kokonaisdeformaatiota. Deformaatiomitoituksen tuloksena mitoitettut rakennekerrokset olivat kuitenkin huomattavan paksuja jo alhaisimmilla kuormituksilla, joten lopullisten mitoitusaulukoiden laadinnassa deformaatiota ei otettu huomioon. Vuosaaren sataman rakennekerrosten mitoituksen yhteydessä tehtiin erillinen pysyvien muodonmuutosten tarkastelu VTT:n kehittämällä tietokoneohjelmalla, jolla pystyttiin vertaamaan kahden rakenteen deformaatiokestävyyttä. VTT:ssa tehtiin Vuosaaren rakennekerrosten mitoitusta varten myös taustaselvitys sitomattomien rakennekerrosten pysyviin muodonmuutoksiin vaikuttavista tekijöistä (Korkiala-Tanttu ym., 2004). Pysyvien muodonmuutosten käsittely oli lopulta yllättävän vähäisessä osassa käsitellyissä mitoitusohjeissa ja -menetelmissä.

### **Rakennekerrosmateriaalit ja materiaaliparametrit**

Asphalt Instituten käyttämä syväasfalttirakenne säästää leikkausmassoissa ja sitomattomissa rakennemateriaaleissa, mutta paksut asfalttikerrokset ovat kalliita. Lisäksi monissa suurissa rakennushankkeissa rakennekerrosmateriaalit saadaan edullisesti hankkeen sisäisistä louhinnoista ja maaleikkauksista, kuten Vuosaaren satamassa. Syväasfalttirakennetta ei ole Suomessa käytetty, koska routamitoituksen takia tarvitaan joka tapauksessa paksut rakennekerrokset. Syväasfaltti soveltuu kuitenkin myös Suomessa käytettäväksi kevennysrakenteen päällä, kun tarvitaan erittäin jäykkää ja kantavaa päällysterakennetta. Syväasfalttirakennetta olisi mahdollista käyttää myös esimerkiksi katualueilla, joilla tasauksen nosto ei ole mahdollista. Toisaalta paksu asfalttikerros vaikeuttaa kadun avaamista, joka vaaditaan kunnallisteknisiä rakenteita uusittaessa ja huollettaessa.

Interpaven ja CBI:n mitoitusmenetelmissä päällystemateriaalina käytettiin betonista sidekiveä. Sidekiveä käytetään Suomessa lähinnä katualueilla eikä sen käyttö laajoilla kenttäalueilla ole kovin yleistä. Nykyään sidekiven asennus on nopeaa myös suurille kentille, joilla voidaan hyödyntää nopeaa koneellista asennusta. Betonikivipäällysteen kunnossapitokustannukset ovat kuitenkin tavallista asfalttipäällystettä korkeampia, koska päällysteen toimivuus vaatii asennushiekan säännöllistä lisäämistä. Betonikeskuksella (2007) on oma mitoitusohje betonikiveyksille, jossa mitoitus perustuu katuluokan mukaan määräytyvään tavoitekantavuuteen. Ohjeessa suositellaan sidotun kantavan kerroksen

käyttämistä betonikiveyksen ja asennushiekan alla. Ohjeen mukaan sidotun kantavan kerroksen käytöllä voidaan kantavuuden parantamisen lisäksi estää epätasaiset painumat, tasoittaa alustan kantavuuseroja sekä helpottaa työnaikaista talvikunnossapitoa ja liikkumista. Sidottu kantava kerros aiheuttaa kuitenkin rakenteen kuivatusongelman, koska vesi ei pääse poistumaan alempiin rakennekerroksiin. Asennushiekan kantavuus heikkenee, mikä aiheuttaa kokonaiskantavuuden heikkenemistä ja urautumista. Ohjeen mukaan tasaussuunnitteluun onkin kiinnitettävä erityistä huomioita sidotun kantavan kerroksen rakenteilla ja tarvittaessa porattava reikiä sidottuun kantavaan kerrokseen tasauksen alimmissa kohdissa.

Interpaven menetelmässä kantava kerros on maabetonia ja vaihtoehtoisten rakennekerrosten paksuus määritetään vastaavuuskertoimen perusteella. Mitoitusohjeessa käytetty vastaavuuskertoimien laskentakaava (kaava 4.5) eroaa kuitenkin yleisesti käytetystä Odemarkin vastinkaavasta (kaava 2.13). Interpaven käyttämällä kaavalla lasketut vastaavuuskertoimet ovat suurempia, mikä lisää liiallista varmuutta vaihtoehtoisten rakennekerrosten kestävyydelle. Myös CBI:n menetelmällä mitoitettujen kokonaisrakennepaksuudet ovat suhteellisen suuria, kun otetaan lisäksi huomioon erillisen routamitoituksen puuttuminen. Ylimitoitukseen vaikuttavat erityisesti mitoitusohjeessa käytetyt jäykkyysmoduulit, joiden suuruudessa ei oteta huomioon rakennekerrosten jännitystilaa.

Interpaven mitoitusohjeessa konttikuormille ja liikennekuormille käytetyt materiaaaliparametrit olivat yhtä suuria. CBI:n mitoitusohjeessa konttikuormille käytetyt rakennemateriaalien staattiset jäykkyysmoduulit olivat selvästi liikennekuormille käytettyjä jäykkyysmoduuleja alhaisempia. Kantavan kerroksen asfalttibetonille käytettiin 150 MPa:n staattista jäykkyysmoduulia, mikä vastasi kantavan kerroksen kalliomurskeen staattista jäykkyysmoduulia. Tämä tarkoittaa periaatteessa sitä, että sideaineen vaikutus on pitkäaikaiskuormituksessa jätetty kokonaan huomioimatta.

Suomessa on tehty jonkin verran tutkimusta staattisille kuormituksille käytettävistä materiaaaliparametreista. EVTEK-ammattikorkeakoulussa tehdyssä insinööriyössä (Siika, 2006) vertailtiin staattisia ja dynaamisia kantavuusmittauslaitteita sekä mitattiin erilaisten asfalttimassojen staattisia jäykkyysmoduuleja 5, 10, 30, 120, 600 ja 1800 s kuormitusajoilla. Mitatut staattiset jäykkyysmoduulit vaihtelivat välillä 23 - 1135 MPa. Tässä tutkimuksessa jäykkyysmoduulit mitattiin standardinmukaisesti 0,1 s kuormitusajalla. Jäykkyysmoduulien tutkiminen pidemmällä kuormitusajalla on yksi mahdollinen jatkotutkimusalue.

Mitoitusmenetelmiä käytettäessä tulee ottaa huomioon, että ne eivät sovellu rakennekerrosten mitoitukseen suuren kantavuuden omaaville kalliopohjille ja louhetäytöille. Asphalt Institutin mitoitusohjeessa jouduttiin arvoja ekstrapoloimaan jo vaihtoehtoisessa mitoituksessa käytetyllä alusrakenteen kantavuudella 280 MPa. Interpaven menetelmässä kantava alusrakenne otetaan huomioon ainoastaan redusoidun pyöräkuorman laskemiseen käytetyssä tehollisen laskentasyvyyden arvossa, mikä ei kuitenkaan vaikuta merkittävästi kantavuuden ollessa suuri. CBI:n mitoitusohjeessa jäykkyysmoduulin arvo kantavimmalle



pohjamaaluokalle 1 oli vain 150 MPa. HIPAVE:a ei päästy testaamaan riittävästi, joten sen toimivuudesta kantavammilla alusrakenteilla ei ole varmuutta.

### Witczakin mallilla laskettujen dynaamisten moduulien ja laboratoriossa mitattujen jäykkyysmoduulien vertailu

Laboratoriossa mitattujen jäykkyysmoduulien arvioimiseksi suoritettiin laskennat Witczakin ennustemallilla (NCHRP, 1999), jonka lähtötietoina käytettiin mitattuja tyhjätiloja, sideainepitoisuuksia, päällystekiviaineksen rakeisuuksia sekä sideaineluokkien perusteella määritettyjä viskositeetteja. Taulukossa 32 on esitetty viiden koekappaleen laboratoriossa mitatut jäykkyysmoduulit ja Witczakin ennustemallilla lasketut dynaamiset moduulit. Laskennat on esitetty liitteessä J.

Taulukko 32. Jäykkyysmoduulien E ja Witczakin mallilla laskettujen dynaamisten moduulien  $|E^*|$  vertailu.

| Koekohde,<br>koekappale ja<br>sideaineluokka *  | E / $ E^* $<br>11 - 14 °C [MPa] |                | Erotus<br>[%] | E / $ E^* $<br>21 - 23 °C [MPa] |                | Erotus<br>[%] |
|---|---------------------------------|----------------|---------------|---------------------------------|----------------|---------------|
|   | Laboratorio                     | Witczak        |               | Laboratorio                     | Witczak        |               |
| <b>Jätkäsaari</b><br>Koekappale 1<br>B50/70   | 4100                            | 4491           | +10           | 1214                            | 2162           | +78           |
| <b>Sompasaari</b><br>Koekappale 4<br>B70/100  | 3471                            | 4011           | +16           | 669                             | 1719           | +157          |
| <b>Tikkurila</b><br>Koekappale 2<br>B35/50  | 7907                            | 12093          | +53           | 3288                            | 5799           | +76           |
| Koekappale 4<br>B70/100 (B50/70)  | 5167                            | 4213<br>(5554) | -18<br>(+7)   | 1564                            | 1994<br>(2708) | +27<br>(+73)  |
| Koekappale 5<br>B100/150 (B50/70)   | 5452                            | 3488<br>(5494) | -36<br>(+1)   | 986                             | 1761<br>(2280) | +78<br>(+192) |
| * vanhentuneen bitumin näennäinen sideaineluokka, jonka perusteella määritettiin parametrit VTS ja A bitumin viskositeetin laskemiseksi |                                 |                |               |                                 |                |               |

Erot laboratoriossa mitattujen jäykkyysmoduulien ja laskennallisten dynaamisten moduulien välillä vaihtelivat paljon eri testilämpötiloissa. Jätkäsaaren ja Sompasaaren koekappaleille matalammassa testilämpötilassa mitatut jäykkyysmoduulit olivat lähes yhtä suuria kuin laskennalliset dynaamiset moduulit. Erot olivat suuremmat korkeammassa testilämpötilassa. Tikkurilan linja-autotermiinalin koekappaleille 4 ja 5 lasketut dynaamiset moduulit olivat pienempiä kuin laboratoriossa mitatut jäykkyysmoduulit. Kappaleessa 6.1.2 näiden kahden koekappaleen sideaineiden tunkeumia pidettiin epäilyttävän suurina, joten laskennalliset dynaamiset moduulit määritettiin myös vaihtoehtoisella sideaineluokalla. Witczakin mallilla lasketut arvot vahvistavat epäilyjä epätavallisen suurista tunkeuma-arvoista.

Suurimman epävarmuuden laskennallisten dynaamisten moduulien suuruuteen aiheuttavat laskentamenetelmän tarkkuus, arvioidut sideaineluokat sekä mitatut tyhjätilat, jotka olivat Jätkäsaaren koekappaleella 1 ja Sompasaaren koekappaleella 4 epätavallisen pieniä. Käytetyt koekappaleet muodostuivat pääasiassa kahdesta kerroksesta, mikä aiheuttaa epävarmuuden myös laboratoriossa mitattuihin jäykkyysmoduuleihin. Kerrosrajan vaikutus riippuu luonnollisesti sen sijainnista kuormituspalkin suhteen ja myös kerrosten välisestä kitkasta. Vaikutuksen suuruus saattaa vaihdella myös eri testilämpötiloissa.

### **Witczakin mallilla laskettujen dynaamisten moduulien ja suoralaskennalla määritettyjen jäykkyysmoduulien vertailu**

Witczakin mallilla (NCHRP, 1999) laskettuja dynaamisten moduulien arvoja vertailtiin myös suoralaskennan tuloksiin. Vertailuarvoina käytettiin dynaamisen moduulin arvoja lämpötilavälillä 21 - 23 °C, joka vastaa pitkälti päällysteen lämpötilaa pudotuspainomittausten aikana. Suoralaskennan vertailuarvoiksi valittiin keskiarvot Jätkäsaaren ja Sompasaaren koekohteista. Tikkurilan linja-autoterminalista valittiin poranäytekohdille lasketut jäykkyysmoduulit. Witczakin mallissa kuormitustaajuutena käytettiin KUAB-kuormituksen mukaista 45 Hz:ä. Laskennat on esitetty liitteessä J ja tulosten yhteenveto taulukossa 33.

Taulukko 33. Witczakin mallilla laskettujen dynaamisten moduulien ja suoralaskentatulosten vertailu

| Koekohde, koekohde<br>ja sideaineluokka *   | E ja  E*  [MPa] |               | Erotus [%] |
|---|-----------------|---------------|------------|
|   | Witczak         | Suoralaskenta |            |
| <b>Jätkäsaari</b>   |                 |               |            |
| Koekappale 1, B50/70<br>Kentän keskiarvo  | 6529            | 5368          | +22        |
| <b>Sompasaari</b>   |                 |               |            |
| Koekappale 4, B70/100<br>kentän keskiarvo   | 5505            | 5692          | -3         |
| <b>Tikkurila</b>  |                 |               |            |
| Koekappale 2, B35/50<br>linja 1 paalu. 96   | 15365           | 5800          | +165       |
| Koekappale 4, B70/100<br>linja 1 paalu. 131   | 6431            | 6264          | +3         |
| Koekappale 5, B100/150<br>linja 1 paalu. 76   | 5806            | 9300          | -38        |
| * vanhentuneen bitumin näennäinen sideaineluokka, jonka perusteella määritettiin parametrit VTS ja A bitumin viskositeetin laskemiseksi |                 |               |            |

Taulukossa 32 esitetyn vertailun tapaan myös taulukossa 33 esitetyt moduuliarvot eroavat eniten Tikkurilan linja-autotermiinalin koekappaleella 2. Muuten erot ovat suhteellisen pieniä ja jäykkyysmoduulien suhteet eli erotuksen etumerkit vaihtelevia. Witczakin mallilla lasketut arvot pyrkivät kuvaamaan suoralla puristuskokeella mitattua dynaamista moduulia. Dynaamisen kokeen kuormitustapa ja kuormituksen aiheuttama jännitystila kuvaavat paremmin todellista kuormitusta kuin epäsuoran vetokokeen kuormitus. Laboratorio-olosuhteissa ei pystytä kuitenkaan täydellisesti jäljittelemään todellista kuormitustilannetta, jonka simuloimiseen käytetty pudotuspainolaite soveltuu parhaiten. Pudotuspainolaitteen oikeasta kuormitustavasta huolimatta myös suoralaskentatuloksiin liittyy jäykkyysmoduulin määrittäytavasta aiheutuvia epävarmuuksia. Jäykkyysmoduulin laskenta perustuu pinnasta mitattuihin taipumiin, joihin vaikuttavat myös päällysteen alla olevat rakennekerrokset. Tästä syystä laboratoriokoetuloksista ja taipumasuppiloista laskettujen jäykkyysmoduulien erot voivat johtua useammastakin eri epävarmuustekijästä.

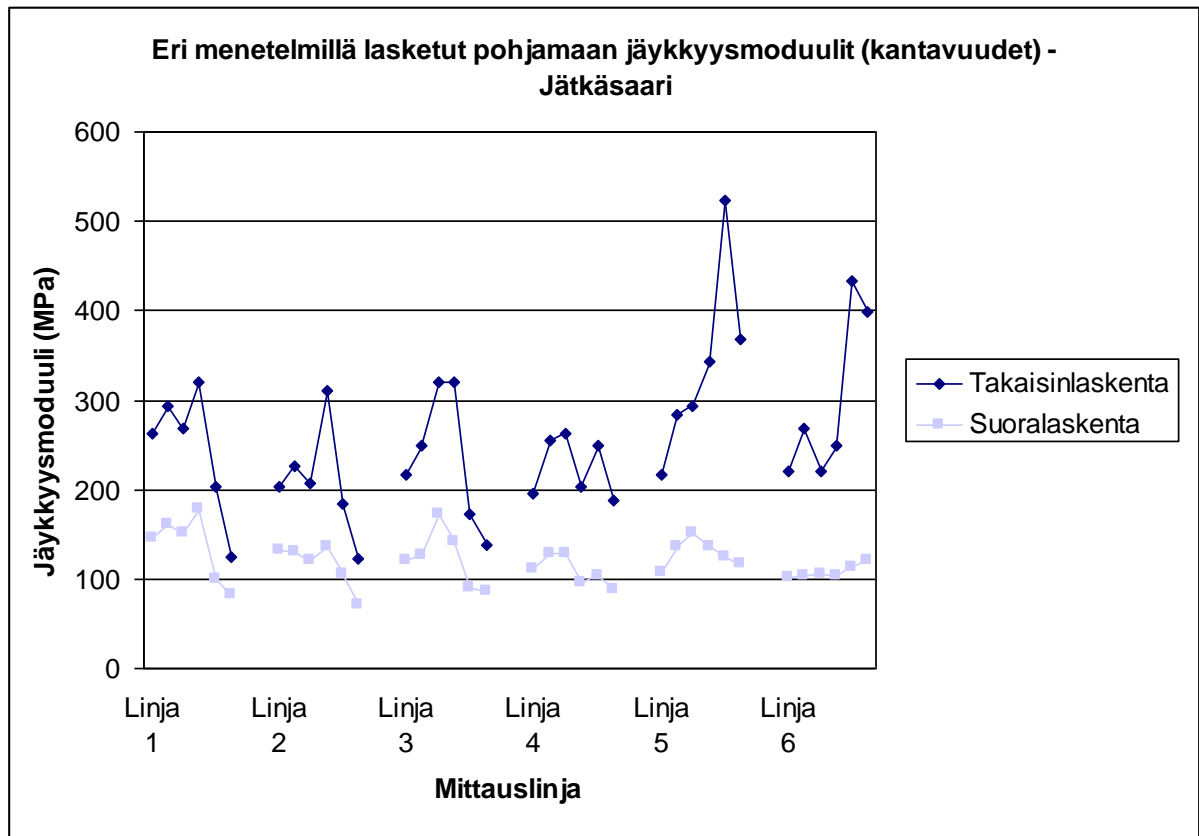
### **Pudotuspainomittaukset ja pohjamaan kantavuuden laskentamenetelmät**

Ensimmäisissä pudotuspainomittauksissa käytetty Heavy Loadman todettiin epävarmaksi mittaumenetelmäksi paksun päällystekerroksen päältä tehtäville kantavuusmittauksille. Epävarmuus johtuu erityisesti laitteella mitatun kantavuuden määrittäytavasta ja laitteen kuormituskapasiteetista. Heavy Loadmanilla mitattu kantavuus ei perustu suoraan mitattuun taipumaan vaan kuormituslevyn kiihtyvyyteen, joka integroidaan taipumaksi (AL-Engineering Oy, 6.4.2011). Tutkimuksessa käytetyn KUAB -pudotuspainolaitteen oma massa on lisäksi Heavy Loadmania suurempi, minkä lisäksi KUAB seisoo mittauksen aikana erillisillä tukijaloilla. Heavy Loadmanissa ei ole erillisiä tukijalkoja ja mittauksessa käytetty peräkärry seisoo jatkuvasti omien renkaidensa varassa.

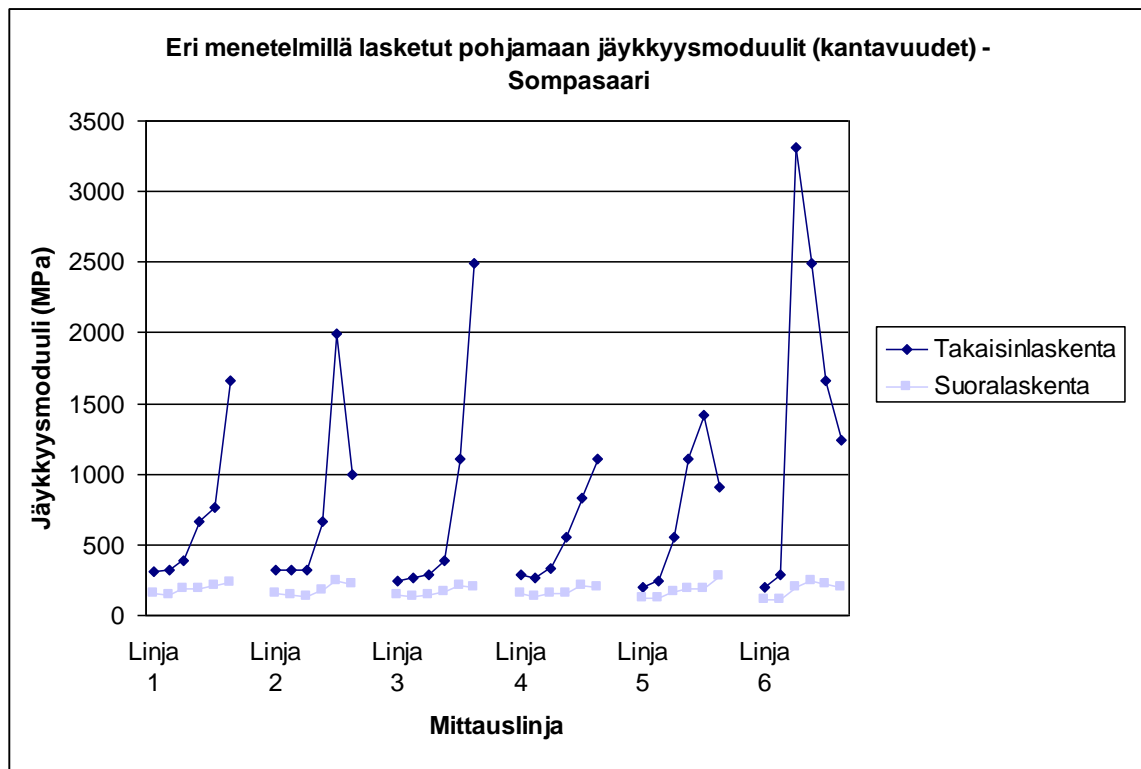
Tierakennekerrosten mitoituksessa alusrakenteen kantavuutena käytetään pohjamaan jäykkyysmoduulia. Pudotuspainomittausten tulosten yhteydessä esitetty alusrakenteen kantavuus määritettiin takaisinlaskennan kaavalla ja maatutka-aineistossa esitetyt jäykkyysmoduulit suoralaskentamenetelmällä. Kuvissa 78 - 80 on esitetty vertailu takaisinlaskennalla (kaava 5.1) laskettujen pohjamaan jäykkyysmoduulien ja suoralaskennalla määritettyjen pohjamaan jäykkyysmoduulien välillä. Kuvista voidaan havaita, että takaisinlaskennan jäykkyysmoduulit ovat selvästi suoralaskennalla määritettyjä pohjamaan jäykkyysmoduuleja suurempia. Jätkäsaarella ja Tikkurilan linja-autotermiinalissa suoralaskennan jäykkyysmoduulit ovat keskimäärin noin 50 % takaisinlaskennan jäykkyysmoduuleista ja Sompasaarella noin 30 %. Ainakin Jätkäsaaren ja Tikkurilan linja-autotermiinalin tuloksista voidaan kuitenkin havaita, että eri menetelmillä laskettujen kantavuuksien välillä on selvä korrelaatio.

Pohjamaan jäykkyysmoduulien suoralaskennan teoriassa on sama ongelma kuin Odemarkin laskennalliseen kantavuuteen perustuvassa rakennekerrosten mitoituksessa. Sekä Hoggin (1944) suoralaskentateoria että Odemarkin (1949) menetelmä perustuvat Boussinesqin laskentakaavoihin, joissa rakennekerrokset oletetaan kokoonpuristumattomiksi. Odemarkin menetelmässä ja suoralaskennassa joudutaan kokoonpuristumattomalle pohjamaan materiaalille käyttämään pienempää jäykkyysmoduulia, jotta laskennallinen tien pinnan

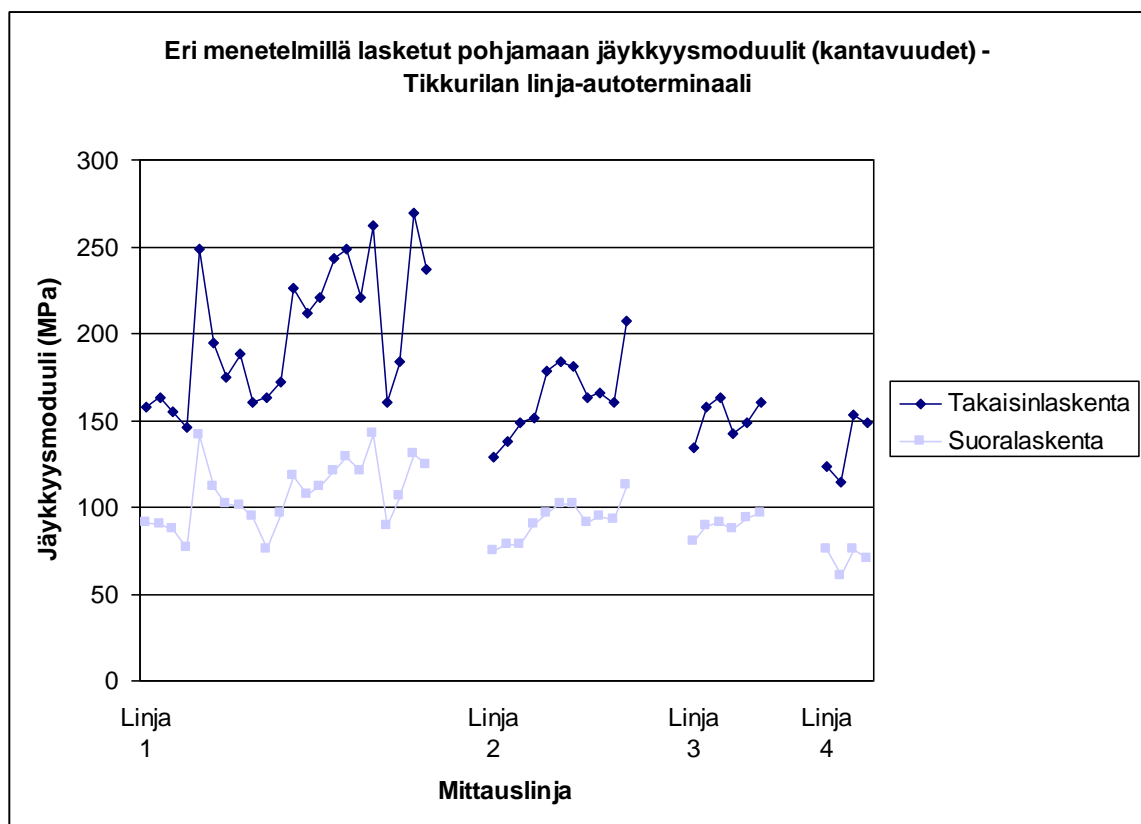
taipuma vastaisi kantavuusmittauslaitteella mitattua taipumaa. Tästä syystä eri menetelmillä lasketut kantavuudet eroavat erityisesti Sompasaaren koekohteessa, jonka alusrakenteena oli kallio. Lisäksi Odemarkin menetelmässä oletetaan, että rakennekerrosten jäykkyysmoduulit pienenevät alaspäin mentäessä. Molemmissa menetelmissä on tärkeää arvioida laskettujen jäykkyysmoduulien järkevyyttä myös taipumasuppilon muodon perusteella. Tässä tutkimuksessa taipumasuppilon muodon perusteella pystyttiin arvioimaan Sompasaaren koekohteen kalliopohja ja Tikkurilan linja-autoterminaalin kantavan kerroksen heikko laatu.



Kuva 78. Eri menetelmillä lasketut pohjamaan kantavuudet Jätkäsaarella.



Kuva 79. Eri menetelmällä lasketut pohjamaan kantavuudet Sompasaassa.



Kuva 80. Eri menetelmillä lasketut pohjamaan kantavuudet Tikkurilan linja-autoterminaalissa.

## 9. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkimuksessa on tarkasteltu neljää ulkomailla kehitettyä mitoitusmenetelmää raskaille pyöräkuormille ja konttikuormille sekä arvioitu mitoitusmenetelmien soveltuvuutta Suomeen. Tutkimuksessa käsitellyt mitoitusmenetelmät olivat Asphalt Instituten (2006) mitoitusohje syväasfalttirakenteille, Englannin betoniyhdistyksen (Interpave, 2007) ja Ruotsin betoniyhdistyksen CBI (Silfwerbrand, 2005) mitoitusohjeet betonikivipäällysteille sekä australialainen raskaille pyöräkuormille tarkoitettu HIPAVE-tietokoneohjelma (Mincad Systems, 2010). Lisäksi tutkimuksessa käsiteltiin Vuosaaren sataman rakennekerroksien mitoitusprosessia (Helsingin Satama, 2005). Mitoitusmenetelmien vertailemiseksi suoritettiin myös Vuosaaren sataman rakennekerrosten vaihtoehtoinen mitoitus yhdellä kuormituskertojen määrällä ja kolmella eri konttikuormituksella.

Kokeellisessa tutkimuksessa selvitettiin kolmen pääkaupunkiseudulla olevan raskaasti kuormitetun kentän rakennekerrokset ja niiden materiaaliominaisuudet. Tutkitut kentät olivat Jätkäsaaren ja Sompasaaren vanhat satamakentät sekä Tikkurilan linja-autoterminaali. Rakennekerrosten paksuuksien ja kantavuuden selvittämiseksi koekohteita tutkittiin käyttäen pudotuspainolaitetta, maatutkaa, rakennekerroskairaa ja putkinäytteenotinta. Rakennekerroksien jäykkyysmoduulit määritettiin suoralaskentamenetelmällä mitattujen taipumasuppiloiden ja maatutkamittauksen rakennekerrostulkinnan perusteella. Laboratoriotutkimuksissa selvitettiin asfalttipäällysteiden jäykkyysmoduulit, deformaatio-ominaisuudet sekä sideaineiden tunkeumat ja pehmenemispisteet. Päällysteen jäykkyysmoduulit määritettiin lisäksi Witczakin ennustemallilla (NCHRP, 1999) sideaineluokkien, sideainepitoisuuksien, tyhjätilojen ja päällystekiviaineksen rakeisuuksien perusteella.

### **Tutkimuksen tärkeimmät johtopäätökset ja suositukset ovat:**

1. Akselikuormituksen muuttamisella redusoiduksi pyöräkuormaksi ei ollut suurta vaikutusta varsinaiseen rakennekerrosten mitoitukseen tutkimuksessa käsitellyillä mitoitusajoneuvoilla, koska tutkimuksen mitoitusajoneuvojen paripyörien etäisyys oli niin pieni, että se ei vaikuttanut merkittävästi rakennekerrosten mitoitukseen. Akselin toisen pään pyörä tai pyörät olivat taas liian kaukana ensisijaisesta pyörästä, jotta ne olisivat vaikuttaneet merkittävästi jännityksiin ensisijaisen pyörän alla. Redusoidun pyöräkuorman käyttäminen mitoittavana kuormana voi kuitenkin olla tarpeellista joillakin satama-ajoneuvoilla. Tarve on siten määritettävä tapauskohtaisesti.
2. Interpaven mitoitusohjeen mukaisten taulukossa 6 esitettyjen dynaamisten kuormituslisien arvojen sijaan on yksinkertaisempaa käyttää ajoneuvon mukaan määräytyvää vakiokuormituslisää. Vuosaaren sataman rakennekerrosten mitoituksessa käytettiin samaa kuormituslisää kaikille mitoitusajoneuvoille. Paikallista kuormituslisää voidaan kuitenkin harkita alueilla, joilla tapahtuu paljon jyrkkiä kääntymisiä. Dynaaminen jännityslisäys on kuitenkin pääasiassa vaakasuuntaista

leikkausjännitystä, joka kohdistuu erityisesti rakenteen pintaosiin. Paikalliset dynaamiset kuormituslisäykset kannattaisi ottaa huomioon käyttämällä parempilaatuista päällystemateriaalia, minkä lisäksi voitaisiin käyttää Vuosaaren sataman mitoituksen vakiokuormituslisän kaltaista arvoa.

3. Rakennekerrosten erillinen deformaatiotarkastelu tehtiin ainoastaan Ruotsin betoniyhdistyksen mitoitusohjeessa, vaikka yksittäisten rakennekerroksien pysyviä muodonmuutoksia pitäisi tarkastella erityisesti suurilla kuormilla ja rengaspaineilla (Huang, 2004). Vuosaaren satamassa eri rakennekerrosvaihtoehtojen deformaatiokestävyyden vertailuun käytettiin VTT:ssä kehitettyä tietokoneohjelmaa. Satamassa käytettyjen rakennemateriaalien valintaa varten VTT:ssä tehtiin lisäksi taustaselvitys (Korkiala-Tanttu ym., 2004) sitomattomien materiaalien muodonmuutoksiin vaikuttavista tekijöistä. Deformaatioon perustuvaa mitoitusta ja siihen perustuvaa mitoituskriteeriä pitäisi tutkia myös APAS:in kehittämistä varten, koska Liikenneviraston (Lehtonen, 2009) tekemien vauriotutkimusten perusteella ohjelmassa käytetty pohjamaan puristusmuodonmuutokseen perustuva mitoituskriteeri ei ole käyttökelpoinen.
4. Erillisen konttikuormille tehtävän ”pistemäisen” rakennekerrosten mitoituksen tarpeellisuus tulisi selvittää esimerkiksi Vuosaaren satamassa tehtävällä vauriokartoituksella. Kartoituksen tulisi keskittyä alueille, joissa konttipinot ovat korkeita ja kuormat suuria. Tutkimukseen valittujen Vuosaaren sataman koekohteiden konttikuormitukset oli vähäisiä verrattuna sataman raskaimmin kuormitettuihin konttialueisiin. Näillä alueilla tehtävät mittaukset vaativat kuitenkin erityisjärjestelyjä, joita satamaoperaattorit eivät välttämättä suostu tekemään, jos vauriot eivät vielä haittaa toimintaa.
5. Interpaven mitoitusohjeen mukaiset taulukoissa 4 ja 7 esitetyt arvot soveltuvat konttien ja konttipinojen kuormien määrittämiseen myös Suomessa. Konttipinojen kuorman määrittäytavasta aiheutuvat epävarmuudet ovat pieniä matalilla konttipinoilla. Epävarmuus kasvaa konttipinon korkeuden kasvaessa, jolloin kasvaa myös konttipinon korkeuden arvioinnin epävarmuus. Taulukon arvot on määritetty 1970-luvulla tehtyjen tutkimusten perusteella. Yleisimmät konttikoot ja niiden kuormituskapasiteetit ovat pysyneet samoina, mutta konttikuormaajien nostokapasiteetit ovat kasvaneet. Yli kolmen kontin pinolle tehtävää rakennekerroksien mitoitusta varten tulisi selvittää konttipinojen kuormitusjakaumat eri lastauskorkeuksilla. Ennen tätä tutkimusta pitäisi tehdä kohdan 4 mukainen tutkimus konttikuormille tehtävän erillismitoituksen tarpeellisuudesta.
6. Pitkäaikaiskuormille tehtävää mitoitusta varten tulisi tutkia rakennekerrosmateriaalien jäykkyysmoduuleja myös pidemmällä kuormitusajoilla. Tätä ennen tulisi kuitenkin tehdä kohdan 4 mukainen selvitys pitkäaikaiskuormille tehtävän erillismitoituksen tarpeellisuudesta. Asfalttipäällysteiden jäykkyysmoduuleja pidemmällä kuormitusajoilla on tutkittu esimerkiksi EVTEK-ammattikorkeakoulussa tehdyssä

opinnäytetyössä (Siika, 2006). Samanlaisia tutkimuksia pitäisi tehdä myös sitomattomilla materiaaleilla. Tämän tutkimuksen mitoitusosiossa käytettiin Ruotsin betoniyhdistyksen ohjeen mukaisia staattisia jäykkyysmoduuleja sekä sitomattomille että sidotuille materiaaleilla. Käytetyt staattiset jäykkyysmoduulit pitkäaikaiskuormille on esitetty taulukoissa 12 ja 13.

7. Ruotsin betoniyhdistyksen mitoitusohjeessa käytetty pitkäaikaiskuormituksen mitoituskriteeri soveltuu myös Suomessa käytettäväksi. Mitoituskriteerinä käytettiin Vägverketin (2005b) tierakenteiden suunnitteluohjeen mukaista pohjamaan suurinta sallittua puristusmuodonmuutosta yksittäiskuormitukselle, jonka suuruus oli 2400  $\mu$ s. Sallittu arvo on annettu liitteen B kartassa esitetylle Ruotsin ilmastoalueelle 2, mutta Vägverketin ohjeessa on annettu arvot myös neljälle muulle ilmastoalueelle. Vastaavaa mitoituskriteeriä ei ole suomalaisissa tierakenteiden mitoitusohjeissa (Tiehallinto, 2004). Pitkäaikaiskuormitus otettiin huomioon käyttämällä staattisia jäykkyysmoduulien arvoja.
8. Asphalt Institutin ohjeen mukaisia syväasfalttirakenteita tai Interpaven käyttämiä paksuja kantavia maabetonikerroksia ei ole Suomessa käytetty, koska routamitoituksen takia joudutaan joka tapauksessa rakentamaan paksut sitomattomat rakennekerrokset. Alueilla, joilla routamitoitusta ei tarvitse ottaa huomioon käytetään ohutta kantavaa kerrosta asfalttipäällysteen alla. Syväasfaltti soveltuu kuitenkin myös Suomessa käytettäväksi kevennysrakenteen päällä tai alueilla, joissa tasauksen nostaminen ei ole mahdollista tai kustannustehokasta. Näissä tapauksissa routasuojaus täytyy tehdä joko lämpö- tai vesieristeillä. Interpaven ja Ruotsin betoniyhdistyksen ohjeissa käytettyä betonikivipäällystettä on käytetty Suomessa lähinnä katualueilla, mutta kehittyneet koneelliset asennusmenetelmät mahdollistavat laajojen kenttien nopean päällystämisen. Betonikivipäällysteen kunnossapitokustannuksia nostaa kuitenkin betonikivien alla ja väleissä käytetyn asennushiekkan lisäämistarve. Ruotsin betoniyhdistyksen mitoitusaulukoiden käyttömahdollisuuksia rajoittavat myös niiden perustuminen ainoastaan yhteen mitoitusakseliin kerrallaan, jolloin vaihtoehtoisia kuormituksia ei voida ottaa huomioon ilman niiden keinokeinoista muuttamista mitoitusakseleiksi.
9. Australialainen HIPAVE-tietokoneohjelma oli mitoitusmenetelmistä tehokkain monimutkaisten kuormituskokonaisuuksien hallinnassa. Mitoitus perustuu kumulatiiviseen vauriokertoimeen, jonka käyttäminen nopeuttaa mitoitusprosessia ja vähentää mahdollista yli- tai alimitoitusta. Ohjelmaa voidaan käyttää myös yleissuunnittelun rinnalla, koska kuormien ja kuormituskertojen määrien muuttaminen on yksinkertaista. Tutkimuksessa käytetyn demoversion sijasta pitäisi kuitenkin käyttää varsinaista ohjelmaversiota tarkemman analyysin tekemiseksi.
10. Mikään tutkituista mitoitusmenetelmistä ei kuitenkaan sovellu suoraan käytettäväksi rakennekerroksien mitoitukseen irtolouhitun kallion tai louhetäyttöjen päälle. Mitoituskuvaajia ei ole joko tehty kyseisille alusrakenteille ja/tai



mitoitusmenetelmässä käytetty laskentateoria on soveltumaton näille alusrakenteille vääristäen niiden todellista kantokykyä. Tällaisilla alueilla on kiinnitettävä erityistä huomiota mitoitustulosten järkevyyteen ja tarvittaessa käytettävä vaihtoehtoista mitoitustapaa.

11. Kokeellisen tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että Sompasaaren mitoitettut rakennekerrokset olivat riittävät. Tämä johtui erityisesti siitä, että koekentän alusrakenne oli kantavaa kalliota. Muu osa Sörnäisten satamasta oli pääasiassa rakennettu kuitenkin pehmeälle täyttömaalle. Jätkäsaarella rakennekerrokset olivat täyttömaata, ja asfalttipäällystettä oli selvästi lisätty lähempänä rantaa painumien korjaamiseksi. Kokemusperäisellä mitoituksella ei ole siis pystytty ottamaan huomioon rakennekerrosten painumista. Konttikiskon vieressä asfalttipäällyste oli ohuempi, ja siihen oli syntynyt konttijalkojen aiheuttamia painumia. Tikkurilan linja-autoterminalissa ongelmia aiheutti kerroksellinen rakenne, joten Odemark-mitoituksen toimivuutta ei voida täysin arvioida. Pintapuolisen arvion perusteella tutkimuksen muissa koekohteissa mitoitus oli riittävä lukuun ottamatta Helsingin maaliikennekeskusta, jonka päällysteessä oli havaittavissa useita painumia ja paikkauskohtia. Maaliikennekeskus on otettu käyttöön vuonna 1970 ja se on perustettu kantavalle kalliopohjalle. Alue on kuitenkin päällystetty luultavasti pehmeämmällä päällysteellä kuin nykyiset kentät ja päällysteen korjaukset on tehty ainoastaan paikkaamalla.
12. Kirjallisuustutkimuksen ja mitoitusosion perusteella voidaan todeta, että raskaasti kuormitetuille kentille tarkoitettu ohjeistus tai varsinainen suunnitteluohje on tarpeellinen. Ohjeessa pitäisi ottaa kantaa ainakin mitoituskuormien määritystapaan sekä dynaamisille että staattisille kuormille, mitoituskriteereihin, kantavuusvaatimuksiin, materiaaliparametreihin sekä vaihtoehtoisin rakennekerrosmateriaaleihin.

## LÄHTEET

AL-Engineering Oy. [www.al-engineering.fi/fi/loadmanfwd.html](http://www.al-engineering.fi/fi/loadmanfwd.html) [Viitattu: 6.4.2011]

Alkio, R., Juvankoski, M., Korkiala-Tanttu, L., Laaksonen, R., Laukkanen, K., Petäjä, S., Pihlajamäki, J., Spoof, H. 2001. Tien rakennekerrosten materiaalit. Taustatietoa materiaalivalinnoille. Tiehallinnon selvityksiä 66/2001. Edita Oyj. Helsinki.  
Saatavissa: <http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/materiaalit66-2001.pdf>

APAS 3.0 2004. Tiehallinto.

Asphalt Institute 2006. MS-23 Thickness Design - Asphalt Pavements for Heavy Wheel Loads, Second Edition. The Asphalt Institute. USA. ISBN 1-934154-15-6

Betonikeskus 2007. Raskaan liikenteen päällysteratkaisut. Betonikeskus ry. Helsinki.  
Saatavissa: <http://www.betoni.com/fi/Betonituotteet/Raskasliikenne>

Carlsson H. 2003. Livslängd på markstenskonstruktioner vid trafikbelastning. VTI notat 29-2003. Statens väg- och transportforskningsinstitut. Linköping, Ruotsi.  
Saatavissa: <http://www.vti.se/EPiBrowser/Publikationer/N29-2003.pdf>

CEN 2007a. EN 1426 Bitumen and bituminous binders - Determination of needle penetration. European committee for standardization. Bryssel, Belgia. ICS 75.140

CEN 2007b. EN 1427 Bitumen and bituminous binders - Determination of the softening point - Ring and Ball Method. European committee for standardization. Bryssel, Belgia.  
ICS 75.140

Ehrola, E. 1996. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Rakennustieto Oy. Helsinki. ISBN 951-682-338-6

Hartikainen, O-P. 1989. Tien päällysterakenteen suunnittelu. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tie- ja liikennetekniikka. ISBN 951-721-305-0

Helsingin kaupunginmuseo. <http://www.hel2.fi/kaumuseo/satama/ssatamat.html> [Viitattu 6.4.2011]

Helsingin Konttikeskus Oy. <http://www.konttikeskus.fi/varastokontit.html> [Viitattu 6.4.2011]

Helsingin Satama 2005. Vuosaaren sataman kenttien ja teiden päällysrakenteet, suunnitteluraportti.

Helsingin Satama 2007. Vuosaaren sataman vaihtoehtoiset päällysterakenteet, päällysrakennekoe II. Rakennuttajan laadunvalvonta (Päällysrakenneurakka 1).

Helsingin Satama 2009a. Helsingin Sataman vuosikertomus 2008. s. 34.

Helsingin Satama 2009b. Vuosaaren sataman vaihtoehtoiset päällysterakenteet, jatkotutkimukset.

Helsingin Satama 2010. Helsingin Sataman vuosikertomus 2009. s. 18.

Horonjeff, R., McKelvey, F.X. 1993. Planning and Design of Airports, Fourth Edition. McGraw-Hill. USA. ISBN 0-07-045345-4

Huang, Y.R. 2004. Pavement Analysis and Design, Second Edition. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, USA. ISBN 0-13-142473-4

Interpave 2007. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries, Fourth Edition. Interpave. Leicester, Englanti.  
Saatavissa: [http://www.paving.org.uk/heavy\\_duty\\_pavements.php](http://www.paving.org.uk/heavy_duty_pavements.php)

Järvinen L. 1991a. Päällysrakenteen mitoitusmenetelmät. Teknillinen korkeakoulu, tietekniikka. Espoo. ISBN 951-22-0859-8

Järvinen L. 1991b. Tien rakenteen suunnittelu. Teknillinen korkeakoulu, tietekniikka. Espoo. ISBN 951-22-0858-X

Kaukokiito Oy. <http://www.kaukokiito.fi/fi/Kaukokiito/Historia/> [Viitattu: 6.4.2011]

Korkiala-Tanttu, L., Onninen H. 2001. TPPT-menetelmäkuvaus 13 - Tien rakennekerrostutkimukset. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Espoo.  
Saatavissa: <http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/13-rakennekerros.pdf>

Korkiala-Tanttu, L., Laaksonen, R., Pienimäki, M. 2004. Karkeiden sitomattomien materiaalien pysyviin ja hetkellisiin muodonmuutoksiin vaikuttavat tekijät. Taustaselvitys. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Espoo.

Korkiala-Tanttu, L. 2010. ma Professori. Aalto-yliopiston insinöörityöiden korkeakoulu. Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos. Georakentaminen. PL 12100, 00076 Aalto. Haastattelu 22.2.2010.

Lehtonen, K. 2009. Tiehallinnon mitoitusmenetelmät: Odemark ja APAS ja niihin liittyvät ongelmat. Aalto-yliopiston insinöörityöiden korkeakoulu: Tien ja kadun rakenteet ja rakentaminen -kurssin aineisto.

Lemminkäinen. CONFALT-esite. Lemminkäinen Infra Oy. Päällystystoiminta. Oulu.  
Saatavissa: [http://www.lemminkaineninfra.fi/fi/Tuotteet\\_ja\\_palvelut/Paallystys/Varasto\\_ja\\_teollisuuslatti](http://www.lemminkaineninfra.fi/fi/Tuotteet_ja_palvelut/Paallystys/Varasto_ja_teollisuuslatti)

Loulizi, A., Flintsch, G.W., Al-Qadi, I.L., Mokarem, D. 2005. Comparison between Resilient Modulus and Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt as Material Properties for Flexible Pavement Design. Transportation Research Board Annual Meeting CD-ROM 2006.

Malmin lentokentän ystävät ry. [www.pelastamalmi.org/fi/luettavaa/historia.html](http://www.pelastamalmi.org/fi/luettavaa/historia.html) [Viitattu: 6.4.2011]

Mincad Systems 2010. HIPAVE 5.0. Mincad Systems Pty. Ltd. Richmond South, Australia. Ohjelman kokeiluversio saatavissa: <http://www.mincad.com.au/zdm/>

NCHRP 1999. Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures. APPENDIX CC-4: Development of a Revised Predictive Model for the Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures. National Co-operative Highway Research Program. Saatavissa: [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/2appendices\\_CC.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/2appendices_CC.pdf). s. 103.

Nettikone. [www.nettikone.com/svetruck/42120-57/833525](http://www.nettikone.com/svetruck/42120-57/833525) [Viitattu: 6.4.2011]

Nobina Finland Oy. <http://www.nobina.com/fi/Finland/Tietoa-yrityksesta/Historia/> [Viitattu: 6.4.2011]

Nynas Bitumen. High Resistance Polymermodified Binders to Secure Durable Asphalt Pavements. Nynas Bitumen. Belgia.

Saatavissa: <http://www.nynas.com/templates/PublicationList.aspx?id=924&epslanguage=EN>

PANK 1995. PANK-4207 Staattinen virumiskoe. Päällystealan neuvottelukunta ry. Saatavissa: [http://www.pank.fi/files/265\\_PANK4207.pdf](http://www.pank.fi/files/265_PANK4207.pdf)

PANK 2007. Asfalttinormit 2008. Päällystealan neuvottelukunta ry. Edita Oy. ISBN 978-952-99985-0-0

Pienimäki, M. 2004. APAS-ohjelman tilanne ja käyttö. Tie- ja geotekniikan teemapäivät. Saatavissa: <http://alk.tiehallinto.fi/tiejageo/pdf/mpienimakiapas2.pdf>

Pihlajamäki, J. 2010. Erityisasiantuntija. Finnmap Infra Oy. PL 114, 00521 Helsinki. Haastattelu 22.10.2010.

Road Consulting Oy. [http://www.roadconsulting.fi/?page\\_id=187](http://www.roadconsulting.fi/?page_id=187) [Viitattu 6.4.2011]

Saarenketo, T. 2006. Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys. Väitöskirja: Oulun yliopisto. Luonnontieteellinen tiedekunta, geotieteiden laitos. Saatavissa: <http://herkules oulu.fi/isbn9514282221/isbn9514282221.pdf>. s. 19-25.

Saarenketo, T. 2010. Toimitusjohtaja (FT). Roadscanners Oy. Urheilukatu 5-7, 96100 Rovaniemi. Haastattelu 6.10.2010.

SFS 2003. SFS-EN 12697-5. Asfalttimassat. Testausmenetelmät. Osa 5: Asfalttimassan maksimitiheyden määrittäminen. Suomen standardisoimisliitto, Helsinki.

SFS 2004. SFS-EN 12697-26. Asfalttimassat. Testausmenetelmät. Osa 26: Jäykkyys. Suomen standardisoimisliitto, Helsinki.

SFS 2005. SFS-EN 12697-25. Asfalttimassat. Testausmenetelmät. Osa 25: Jaksollinen virumiskoe. Suomen standardisoimisliitto, Helsinki.

Siika, T. 2006. Katurakenteiden staattinen ja dynaaminen kantavuus, Insinööritoimisto EVTEK-ammattikorkeakoulu, kemiantekniikan koulutusohjelma. Saatavissa: <http://www.hel.fi/wps/wcm/connect/9f3b34804a1742b89a03fa3d8d1d4668/Instyo.pdf?MOD=AJPERES>

Silfwerbrand, J. 2005. Dimensionering av markstensöveryggnader för industriytor. CBI rapport 1:2005. Cement of Betong Institutet. Tukholma, Ruotsi. ISSN 0346-8240

SKTY 2003. KATU 2002, Kadunrakennuksen tekniset ohjeet. Suomen kuntatekniikan yhdistys. Gummerus Kirjapaino Oy. Jyväskylä. ISBN 952-9710-06-2. s. 275

Spoof, H., Petäjä, S. 2000a. TPPT-menetelmäkuvaus 1 - Pudotuspainolaitemittaus (PPL-mittaus). VTT Yhdyskuntatekniikka, Espoo.  
Saatavissa: <http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/1-pplmittaus.pdf>

Spoof, H., Petäjä, S. 2000b. TPPT-menetelmäkuvaus 2 - Rakennekerrosmoduulien takaisinlaskenta sekä jännitysten ja muodonmuutosten laskenta. VTT Yhdyskuntatekniikka, Espoo.

Stubstad, R.N., Jiang, Y.J., Clevenson, M.L., Lukanen, E.O. 2006. Review of the Long-Term Pavement Performance Backcalculation Results - Final Report. FHWA-HRT-05-150. Federal Highway Administration. USA. Saatavissa:  
<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/05150/05150.pdf> f. s. 3-29.

Suhonen, M. 2010. Asfaltin moduulin määrittäminen servo-hydraulisella UTM-laitteella. Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu. Insinööri- ja arkkitehtuurin tiedekunta. Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos.

Svetruck 2007. Technical description. Svetruck AB. C-2065/10.  
Saatavissa: [http://en.francetruck.com/modules/doc/public/get.php?id\\_doc=33](http://en.francetruck.com/modules/doc/public/get.php?id_doc=33)

Tiehallinto 2004. Tierakenteen suunnittelu. TIEH 2100029-04. Edita Prima Oy. Helsinki.  
Saatavissa: <http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100029-v-04tierakenteensuunn.pdf>

Ullidtz, P. 1987. Pavement Analysis. The Technical University of Denmark. Elsevier. New York, USA. ISBN 0-444-42817-8.

Valtonen, J. 2011. Opettava tutkija (TkT). Aalto-yliopiston insinöörityöiden korkeakoulu. Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos. Tietekniikka. PL 12100, 00076 Aalto.  
Haastattelu 14.2.2011.

Vägverket 2005a. ATB VÄG 2005, Kapitel A - Gemensamma förutsättningar. Vägverket publikation 2005:112. Vägverket. Borlänge, Ruotsi. Saatavissa:  
[http://www.trafikverket.se/PageFiles/29996/kapitel\\_a\\_gemensamma\\_forutsattningar.pdf](http://www.trafikverket.se/PageFiles/29996/kapitel_a_gemensamma_forutsattningar.pdf)

Vägverket 2005b. ATB VÄG 2005, Kapitel C - Dimensionering. Vägverket publikation 2005:112. Vägverket. Borlänge, Ruotsi. Saatavissa:  
[http://www.trafikverket.se/PageFiles/29996/kapitel\\_c\\_dimensionering.pdf](http://www.trafikverket.se/PageFiles/29996/kapitel_c_dimensionering.pdf)

Wardle, L., Oldfield, D. 2005. HIPAVE - A Mechanistic Design Tool for Flexible Port Pavements. Coasts and Ports Australasian Conference. Saatavissa:  
<http://www.mincad.com.au/pdf/HIPAVE%20-%20A%20Mechanistic%20Design%20Tool%20for%20Flexible%20Port%20Pavements.pdf>

Wardle, L., Rickards, I., Lancaster, J., Tighe, S. 2007. Heavy Duty Industrial Pavement Design Guide, Revision 1.035. Mincad Systems Pty. Ltd. Richmond South, Australia. Saatavissa: <http://www.mincad.com.au/zdm/>

Yoder, E.J., Witczak, M.W. 1975. Principles of Pavement Design, Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. USA. ISBN 0-471-97780-2

**Muut lähdeviittaukset (ei luettu):**

Asphalt Institute. 1987. MS-11 Thickness Design - Asphalt Pavements for Air Carrier Airports, Third Edition. The Asphalt Institute. USA.

Asphalt Institute. 1999. MS-1 Thickness Design - Highways & Streets, Ninth Edition. The Asphalt Institute. USA.

Carlsson, H. 2001. Livslängdsberäkningar på markstenskonstruktioner. VTI Notat 49-2001. Statens väg- och transportforskningsinstitut. Linköping, Ruotsi.

Hartikainen, O-P., Jämsä, H. 1986. Tien päällysrakenteiden suunnittelu. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tie- ja liikennetekniikka. Tampere.

Hentilä, V., Slunga, E., Palolahti, A. 1994. Roudan vaikutuksen mallintaminen. Tielaitoksen selvityksiä 8/1994. Geokeskus. Helsinki.

Hogg, A.H.A. 1944. Equilibrium of a Thin Plate on an Elastic Foundation of Finite Depth. Philosophical Magazine, volume 35.

Odemark, N. 1949. Meddelande 77. Undersökning av elasticitetsegenskaperna hos olika jordarter samt teori för beräkning av beläggningar enligt elasticitetsteorin. Statens väginstitut. Tukholma, Ruotsi.

Wiseman, G., Greenstein, J. 1983. Comparison of Methods of Determining Pavement Parameters from Deflection Bowl Measurement. Proceedings of the 7th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.

## LIITTEET

- Liite A Boussinesqin yksikerrosteorian mukaiset laskentakaavat
- Liite B Ruotsin ilmastoalueet tierakennekerrosten mitoituksessa
- Liite C Vuosaaren sataman rakennekerrosten mitoitus
  - C.1 Mitoitusajoneuvot
  - C.2 Yleiskartta
  - C.3 Perustamistapakartta
  - C.4 Mitoitetut rakennekerrokset
  - C.5 Suunnitelmakartta ja lopulliset rakennekerrokset
  - C.6 Stabiloidut rakennekerrokset ja kartta stabiloidusta alueesta
- Liite D Tikkurilan linja-autotermiinalin mittaukset
  - D.1 Mittauspisteet kartalla
  - D.2 Mittauspisteet kartalla + asemapiirustus
- Liite E Jäykkyysmoduulikokeen testiraportti
- Liite F Jaksollisen virumiskokeen testiraportti
- Liite G Pudotuspainomittausten taipumien lämpötilakorjauskaavat
- Liite H Suoralaskennan teoria ja laskentakaavat
- Liite I Laboratoriokokeiden tulokset
  - I.1 Koekappaleiden halkaisijat ja korkeudet
  - I.2 Koekappaleiden massat, tiheydet ja tyhjätilat
  - I.3 Päällystekiviaineksen rakeisuuskäyrät
  - I.4 Sideainepitoisuudet, sideaineen tunkeumat ja pehmenemispisteet
  - I.5 Jäykkyysmoduulit matalammassa testilämpötilassa
  - I.6 Jäykkyysmoduulit korkeammassa testilämpötilassa
  - I.7 Suhteelliset pysyvät muodonmuutokset
- Liite J Witczakin parannetulla mallilla lasketut dynaamiset moduulit
- Liite K Pudotuspainomittaukset - Heavy Loadman FWD
  - K.1 Jätkäsaaren Saukonlaituri
  - K.2 Sompasaaren satamakenttä
  - K.3 Tikkurilan linja-autotermiinali
  - K.4 Vuosaaren satama, koekohde 1
  - K.5 Vuosaaren satama, koekohde 2
  - K.6 Helsingin Maaliikennekeskus

- K.7 Nihtisillan linja-autovarikko
- K.8 Suomenojan linja-autovarikko
- Liite L. Pudotuspainomittaukset - KUAB FWD 50
  - L.1 Jätkäsaaren Saukonlaituri
  - L.2 Sompasaaren satamakenttä
  - L.3 Tikkurilan linja-autotermiinaali
- Liite M. Maatutkausaaineisto
  - M.1 Jätkäsaaren Saukonlaituri
  - M.2 Sompasaaren satamakenttä
  - M.3 Tikkurilan linja-autotermiinaali
- Liite N. Vuosaaren sataman vaihtoehtoinen mitoitus
  - N.1 Asphalt Institute
  - N.2 Interpave
  - N.3 CBI - Ruotsin betoniyhdistys
  - N.4 APAS-mitoitus
  - N.5 APAS-mitoitus - kantavuuslaskennat



Liite A. Boussinesqin yksikerrosteorian mukaiset laskentakaavat (Huang, 2004)

Jännitykset taipuisan kuormituslevyn keskipisteen alapuolella:

$$\sigma_z = q \times \left[ 1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right] \quad (\text{A.1})$$

$$\sigma_r = \sigma_t = \frac{q}{2} \times \left[ 1 + 2 \times \nu - \frac{2 \times (1 + \nu) \times z}{(a^2 + z^2)^{0.5}} + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right] \quad (\text{A.2})$$

Muodonmuutokset taipuisan kuormituslevyn keskipisteen alapuolella:

$$\varepsilon_z = \frac{q \times (1 + \nu)}{E} \times \left[ 1 - 2 \times \nu + \frac{2 \times \nu \times z}{(a^2 + z^2)^{0.5}} - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right] \quad (\text{A.3})$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_t = \frac{q \times (1 + \nu)}{2 \times E} \times \left[ 1 - 2 \times \nu - \frac{2 \times z \times (1 - \nu)}{(a^2 + z^2)^{0.5}} + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right] \quad (\text{A.4})$$

Pystysuuntainen kokoonpuristuma taipuisan kuormituslevyn keskipisteen alapuolella:

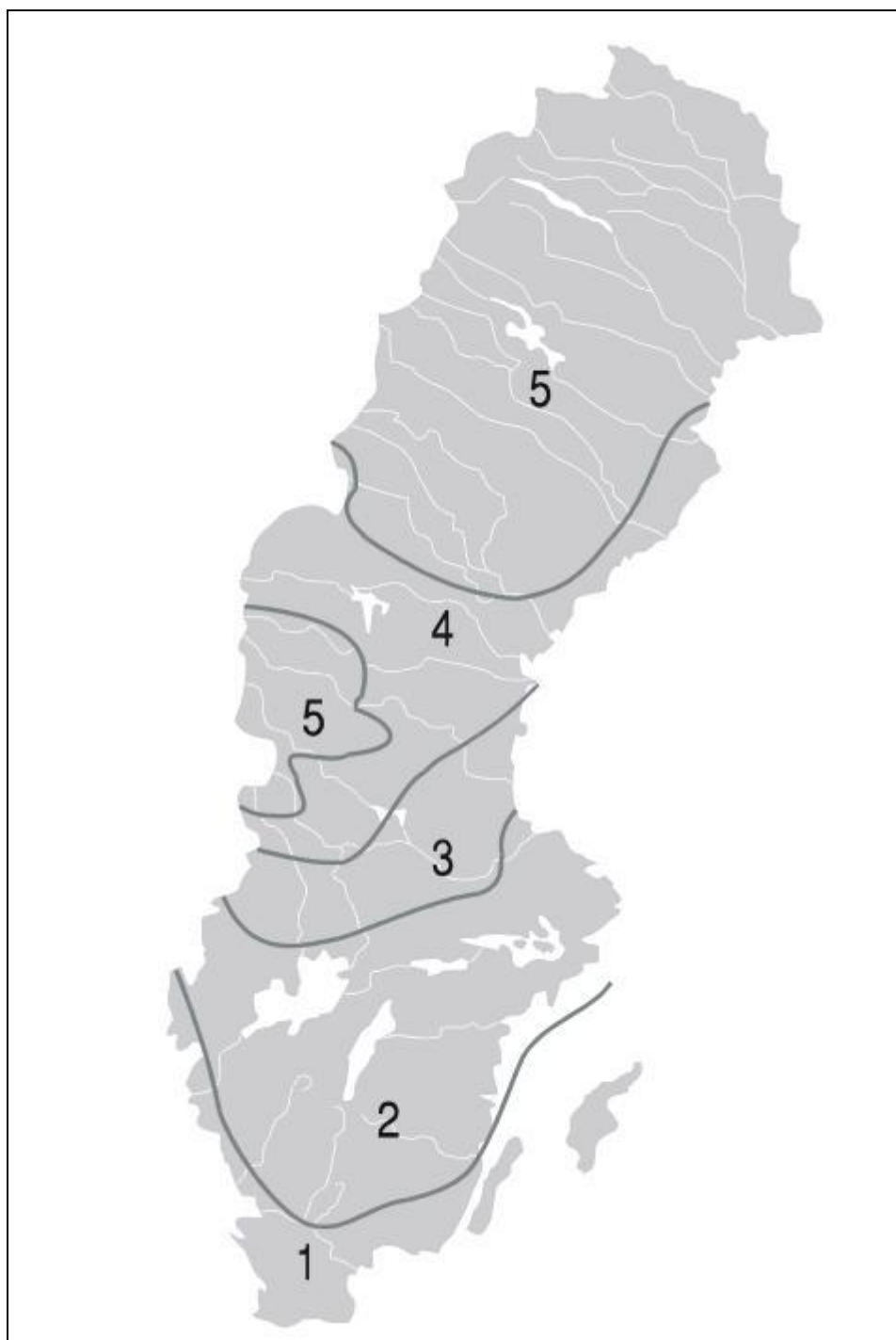
$$w = \frac{q \times a \times (1 + \nu)}{E} \times \left\{ \frac{a}{(a^2 + z^2)^{0.5}} + \frac{1 - 2 \times \nu}{a} \times \left[ (a^2 + z^2)^{0.5} - z \right] \right\} \quad (\text{A.5})$$

Pystysuuntainen kokoonpuristuma syvyydellä  $z = 0$  kuormituslevyn keskipisteen alapuolella (vastaa kantavuusmittauksissa määritettävää tien pinnan taipumaa):

$$w = \frac{2 \times (1 - \nu^2) \times q \times a}{E} \quad (\text{A.6})$$

joissa

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| $\sigma_z$                     | on pystysuuntainen normaalijännitys (MPa)         |
| $\sigma_r, \sigma_t$           | vaakasuuntaiset normaalijännitykset (MPa)         |
| $\varepsilon_z$                | pystysuuntainen muodonmuutos (m/m)                |
| $\varepsilon_r, \varepsilon_t$ | vaakasuuntaiset muodonmuutokset (m/m)             |
| $w$                            | pystysuuntainen kokoonpuristuma (m)               |
| $q$                            | kuormituslevyn aiheuttama tasainen jännitys (MPa) |
| $a$                            | kuormituslevyn säde (m)                           |
| $z$                            | laskentasyvyys (m)                                |
| $E$                            | rakennekerroksen jäykkyyshmoduuli (MPa)           |
| $\nu$                          | Poisson-luku (-).                                 |



Liite C.1. Vuosaaren sataman mitoitusajoneuvot (Helsingin Satama, 2005)

Lukkitrukki (straddle carrier)

|   |         |      |  |
|---|---------|------|--|
|  |         |      |  |
| Akseleiden lukumäärä  | 4       | kpl  |  |
| Raideleveys   | 4452    | mm   |  |
| Omapaino  | 58000   | kg   |  |
| Tyhjän Kontin Massa   | 4500    | kg   |  |
| Keskimääräinen kontti   | 22500   | kg   |  |
| Ajonopeus (kuormattuna)   | 24      | km/h |  |
| Renkaat   | 16 -25" |      |  |

Konttikurottaja (reach stacker)

|  |              |      |  |
|--|--------------|------|--|
|  |              |      |  |
| Akseleiden lukumäärä   | 2            | kpl  |  |
| Raideleveys  | 3825         | mm   |  |
| Omapaino   | 74000        | kg   |  |
| Tyhjän Kontin Massa  | 4500         | kg   |  |
| Kontin Sisältö   | 18000        | kg   |  |
| Ajonopeus (kuormattuna)  | 22           | km/h |  |
| Renkaat  | 18 -33 40 PR |      |  |

Liite C.1 Vuosaaren sataman mitoitusajoneuvot (Helsingin Satama, 2005)

Vastapainotrukki (fork lift truck / front lift truck)



|                         |       |        |
|-------------------------|-------|--------|
| Akseleiden lukumäärä    | 2     | kpl    |
| Raideleveys             | 3825  | mm     |
| Omapaino                | 49500 | kg     |
| Tyhjän Kontin Massa     | 4500  | kg     |
| Kontin Sisältö          | 18000 | kg     |
| Ajonopeus (kuormattuna) | 22    | km/h   |
| Renkaat                 | 18    | *25/36 |

Terminaalitraktori, vetomestari (terminal tractor / trailer)



|                         |       |      |
|-------------------------|-------|------|
| Akseleiden lukumäärä    | 2     | kpl  |
| Raideleveys             | 3825  | mm   |
| Omapaino                | 8700  | kg   |
| Tyhjän Kontin Massa     | 3750  | kg   |
| Kontin Sisältö          | 13250 | kg   |
| Ajonopeus (kuormattuna) | 22    | km/h |
| Renkaat                 | 11    | -20  |



# Vuosaaren satamakeskus Toiminnallinen yleissuunnitelma 30.1.2009



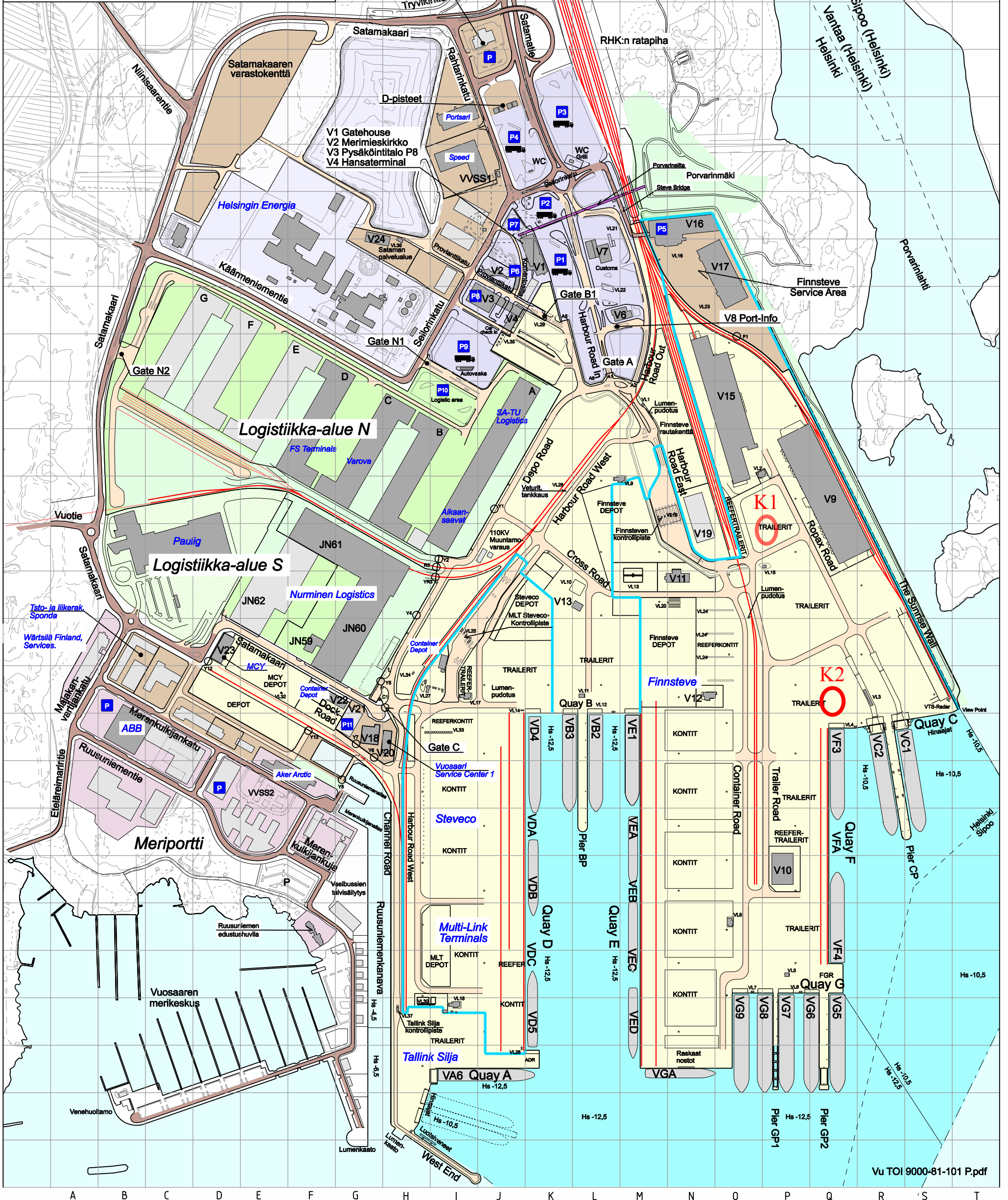
Piirustus nro:  
Vu TOI 9000-81-101 versio P

0 50 100 200 300m

- SULJETTU SATAMA-ALUE
- PORTTIVYÖHYKE
- Rekat  
Työkoneet
- LOGISTIIKKA-ALUE
- MERIPORTIN YRITYSALUE
- HUOLTOALUE
- SATAMAN VESIALUE

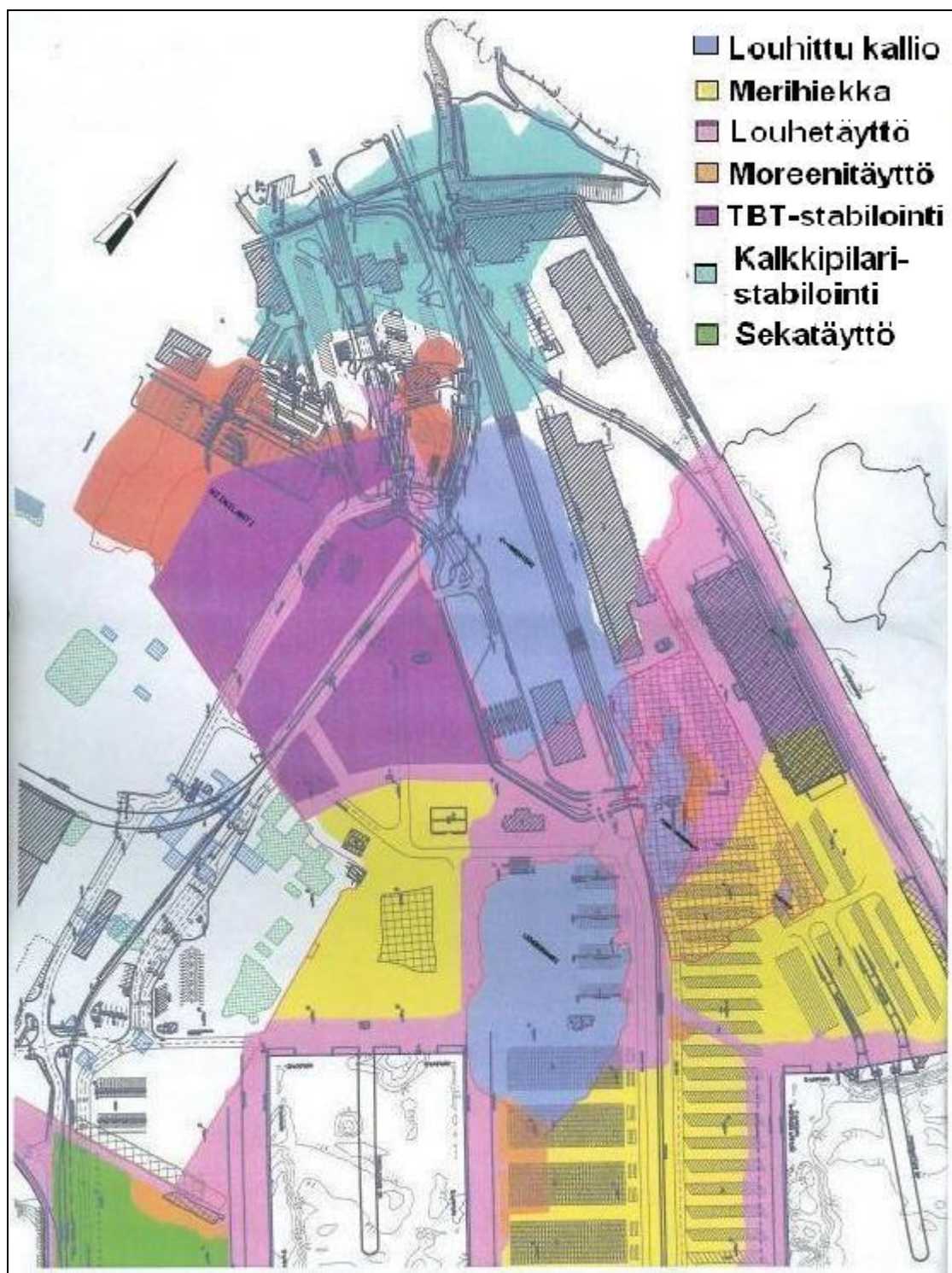
K1 KOEKOHD 1

K2 KOEKOHD 2

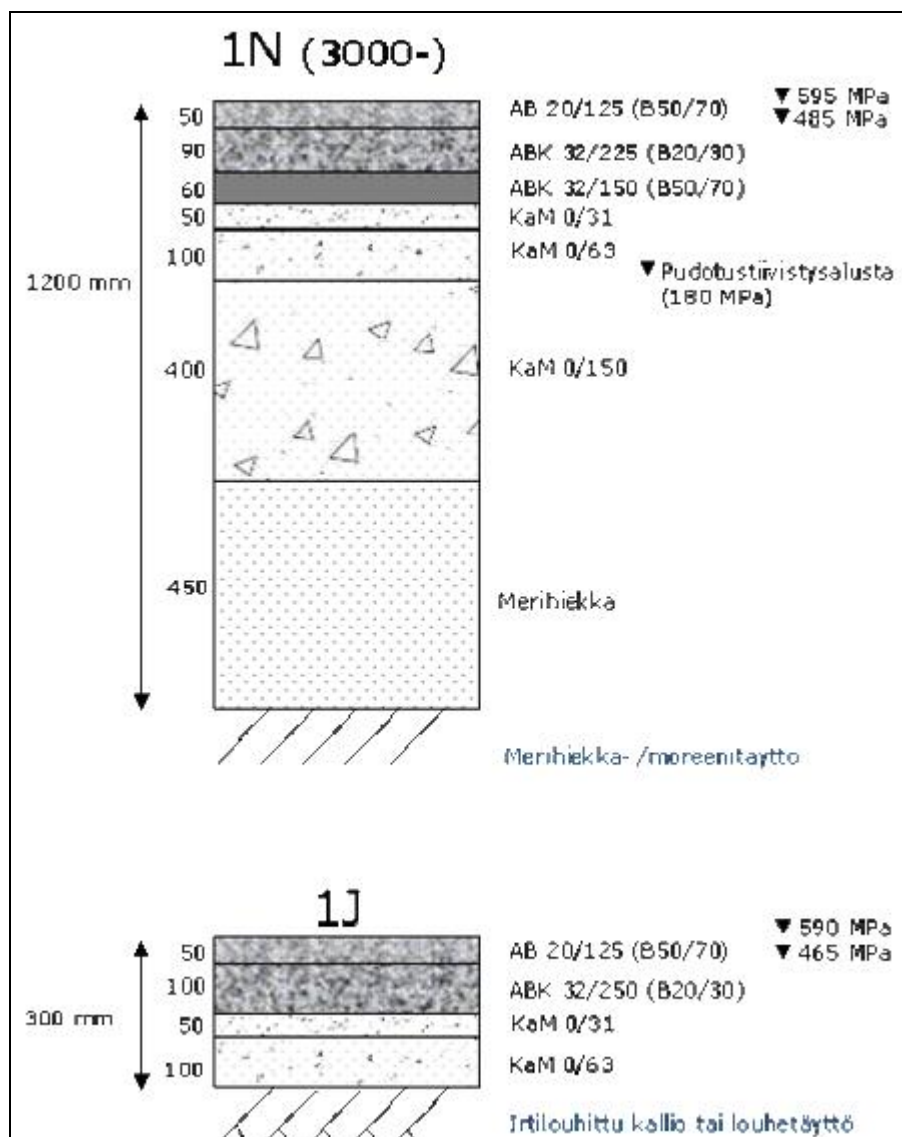




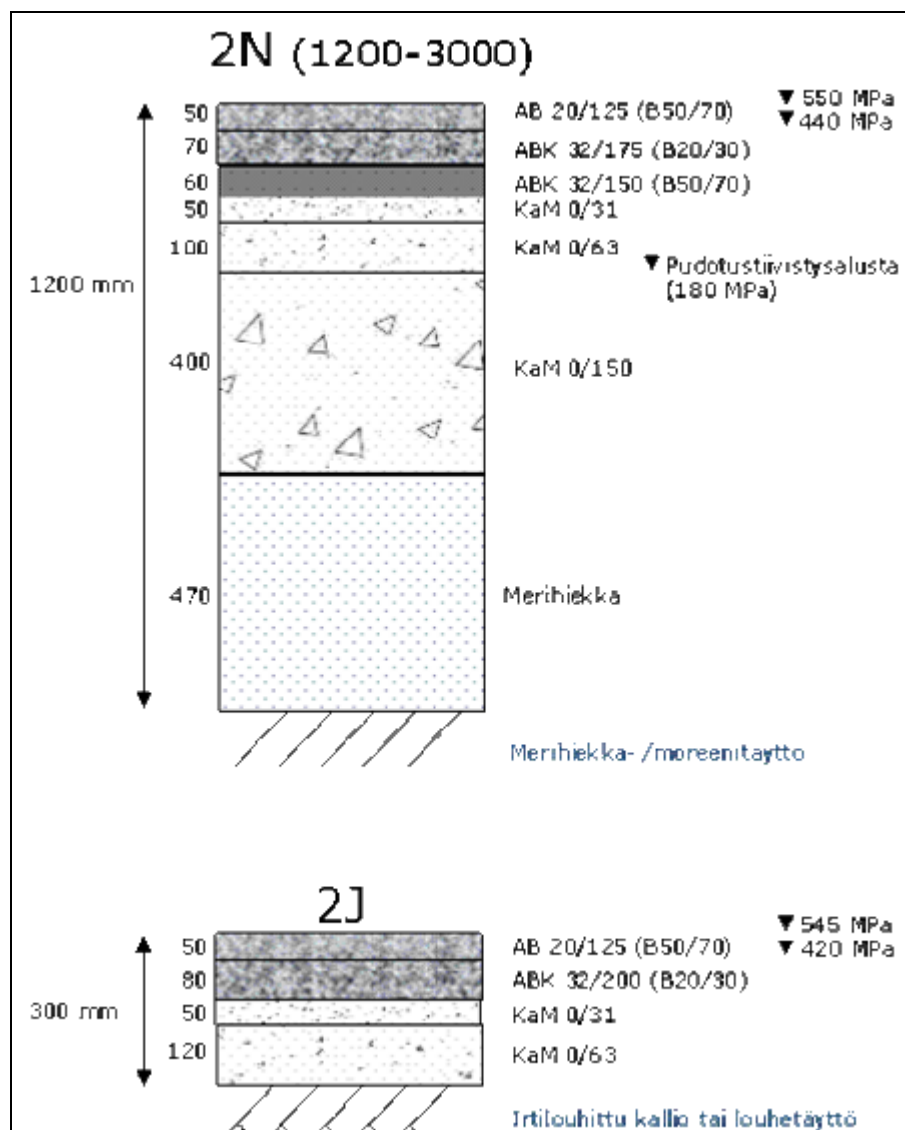
Liite C.3 Vuosaaren sataman perustamistapakartta



Liite C.4 Vuosaaren sataman mitoitetut rakennekerrokset kuormituskertalukuryhmälle 1  
(Helsingin Satama, 2005)

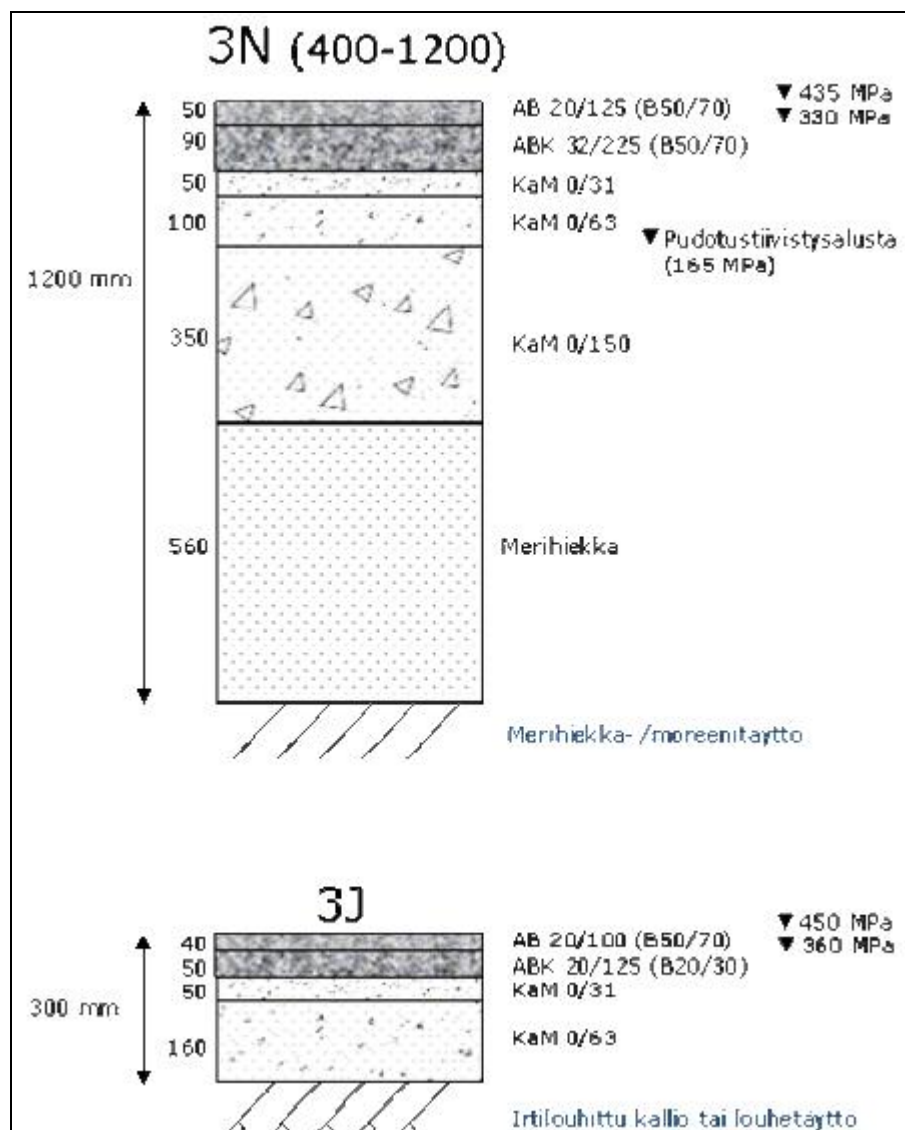


Liite C.4 Vuosaaren sataman mitoitettut rakennekerrokset kuormituskertalukuryhmälle 2  
(Helsingin Satama, 2005)

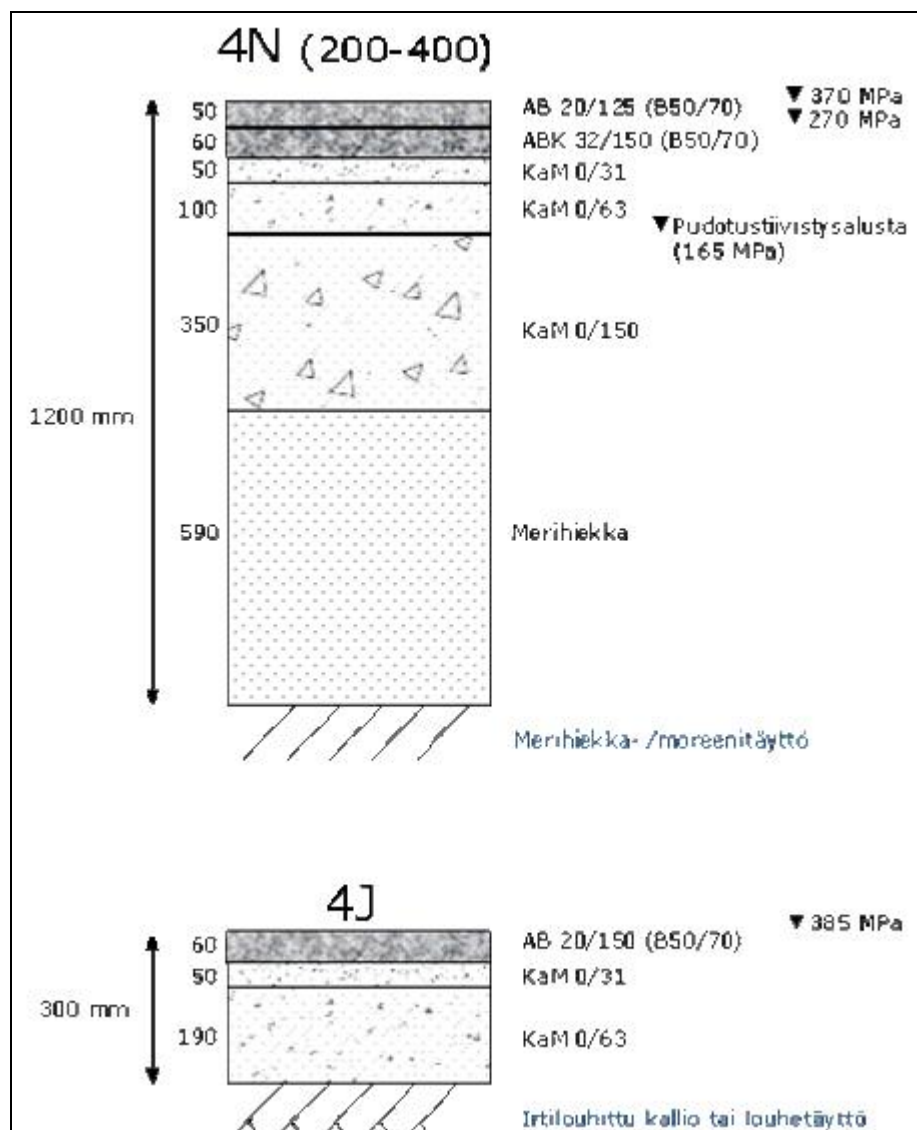




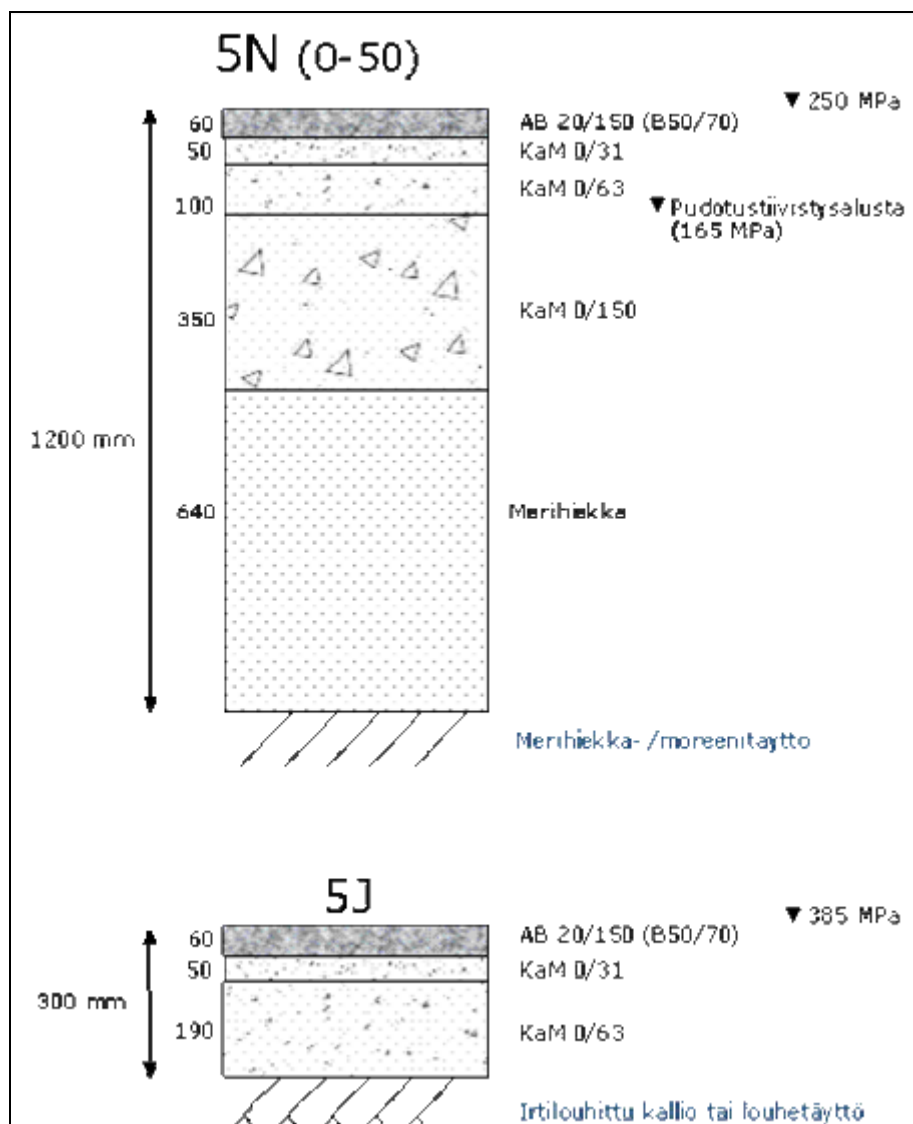
Liite C.4 Vuosaaren sataman mitoitettut rakennekerrokset kuormituskertalukuryhmälle 3  
(Helsingin Satama, 2005)



Liite C.4 Vuosaaren sataman mitoitettut rakennekerrokset kuormituskertalukuryhmälle 4  
(Helsingin Satama, 2005)



Liite C.4 Vuosaaren sataman mitoitetut rakennekerrokset kuormituskertalukuryhmälle 5  
(Helsingin Satama, 2005)

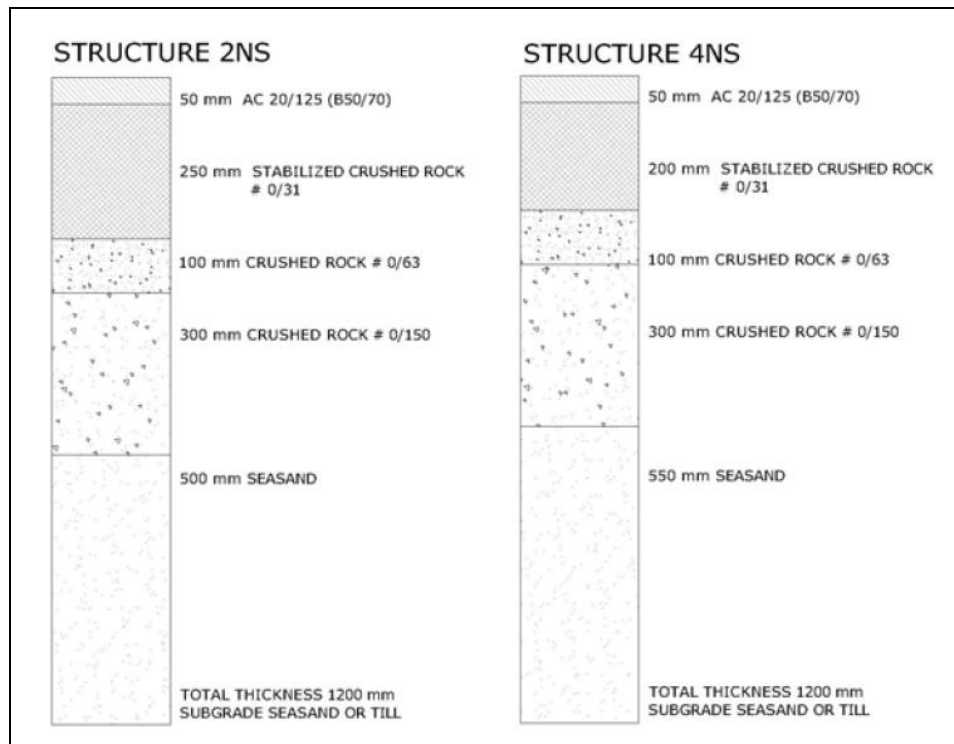




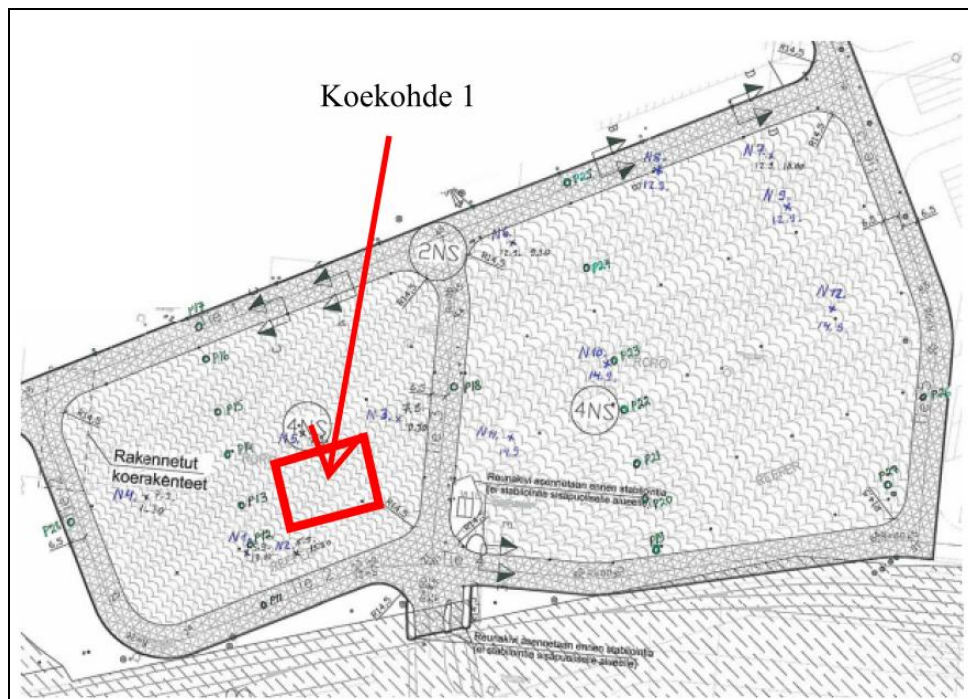




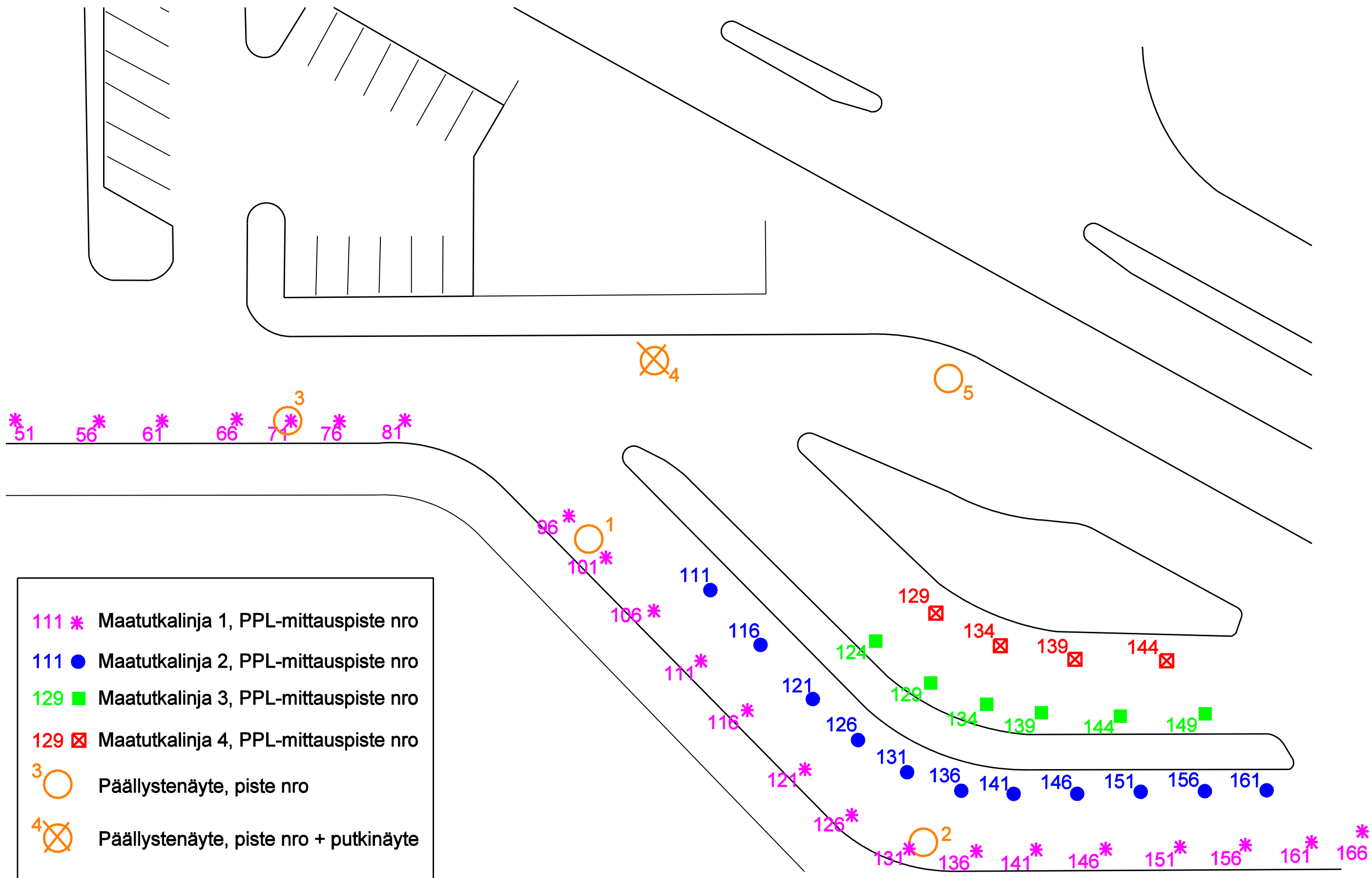
Liite C.6 Vuosaaren sataman stabiloidut rakennekerrokset ja kartta stabiloidusta alueesta



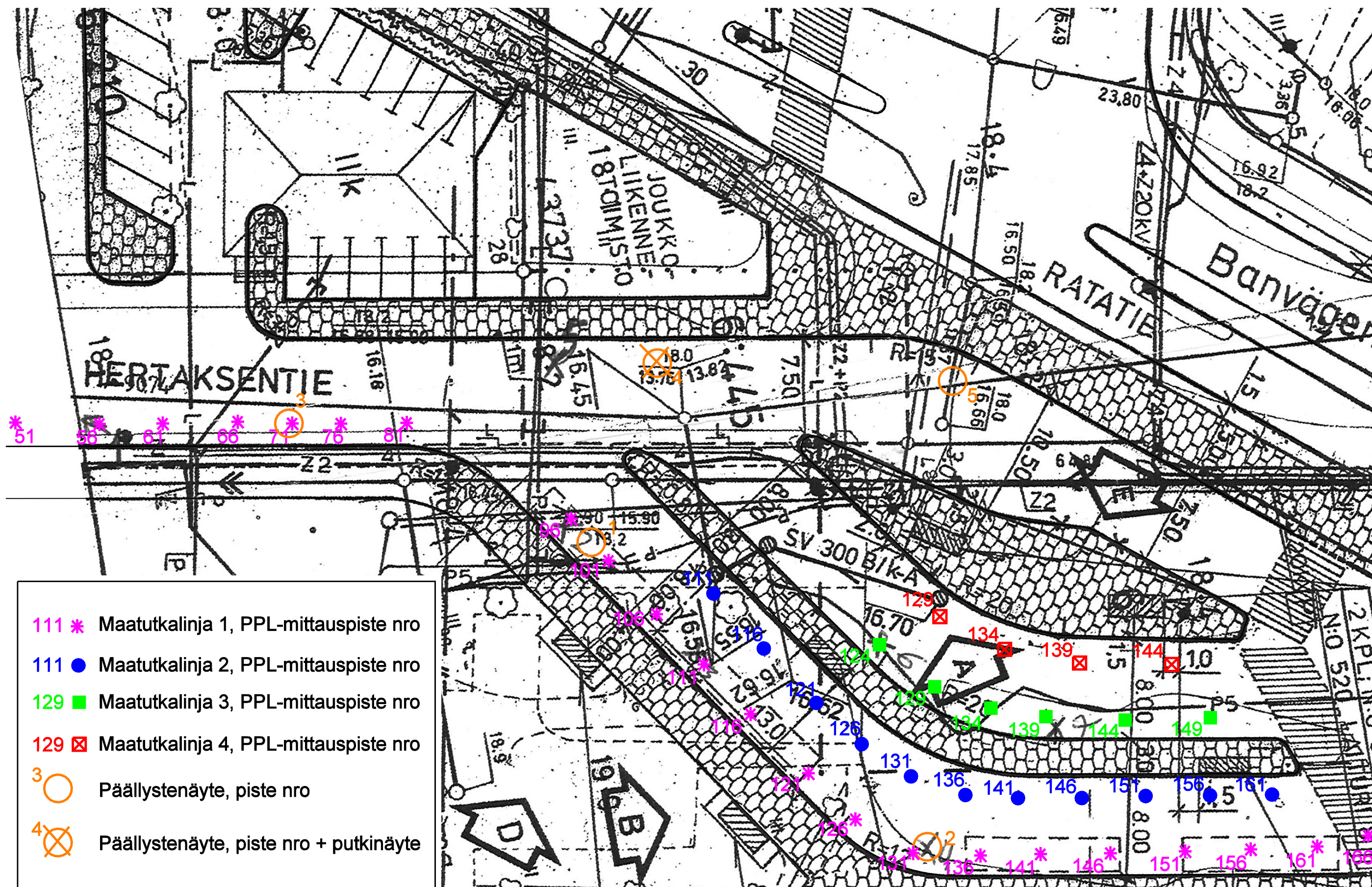
Kuva C.6-1 Stabiloidut rakenteet, KaM + 12 paino-% sideainetta, jossa 2 % sementtiä, 2 % masuunikuonajauhetta, 4 % lentotuhkaa ja 4 % rikinpoiston lopputuotetta (Helsingin Satama, 2007).



Kuva C.6-2 Stabiloidut koerakenteet ja koekohteen 1 sijoittuminen. (Muokattu lähteestä Helsingin Satama, 2007).





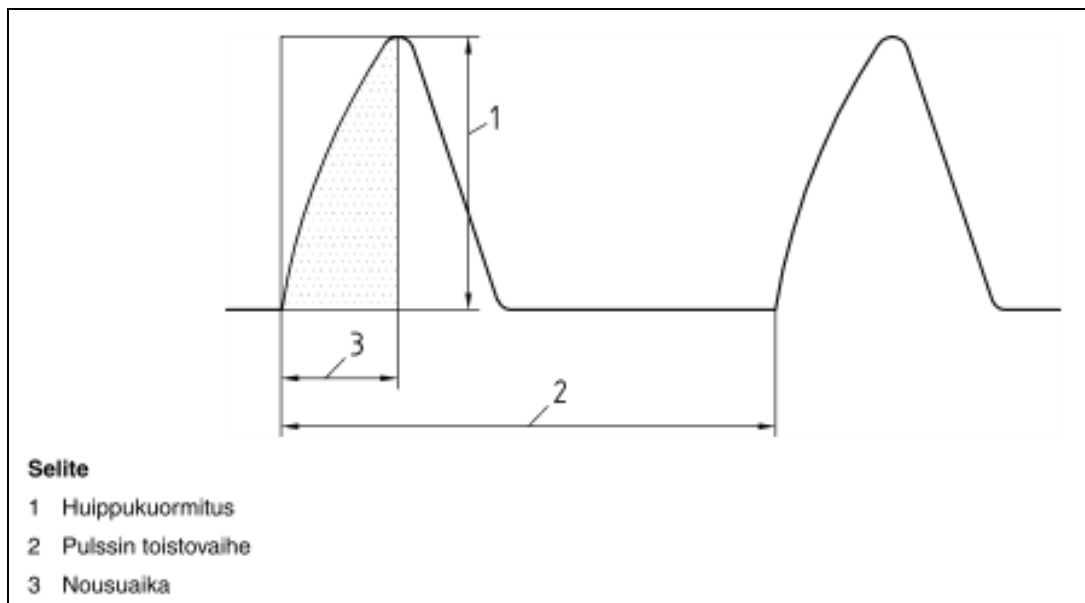




## Liite E. Jäykkyysmoduulikokeen testiraportti

Kokeet suoritettiin standardin SFS-EN 12697-26 (SFS, 2004) mukaisesti. Huippukuormitus säädettiin niin, että saavutettiin näytteen halkaisijan tavoitteellinen 0,005 % suuruinen vaakatasoinen muodonmuutoshuippu. Kuormituspulssin muoto on esitetty kuvassa E-1. Käytetyt kuormitusarvot olivat:

|  |                         |
|--|-------------------------|
| Kuormituspulssin muoto:                        | Puolisini               |
| Tavoitteellinen vaakasuora muodonmuutoshuippu: | $7 \pm 2 \mu\text{m}$   |
| Tavoitteellinen nousuaika:                     | $124 \pm 4 \text{ ms}$  |
| Pulssin toistovaihe:                           | $3,0 \pm 0,1 \text{ s}$ |



Kuva E-1. Kuormituspulssin muoto, nousuaika ja huippukuorma (SFS, 2004).

Jäykkyysmoduulit määritettiin kaavalla

$$S_m = \frac{F \times (v + 0,27)}{(z \times h)} \quad (\text{E.1})$$

jossa

|       |  |
|-------|--|
| $S_m$ | on mitattu jäykkyysmoduuli (MPa)           |
| $F$   | kuormituksen huippuarvo (N)                |
| $z$   | vaakasuoran muodonmuutoksen amplitudi (mm) |
| $h$   | näytteen keskimääräinen paksuus (mm)       |
| $v$   | Poisson-luku.                              |

Jäykkyysmoduulit laskettiin käyttäen Poisson-lukua 0,35 kaikille koekappaleille sekä ylemmässä että alemmassa testilämpötilassa. Testissä mitatun kuormitusalakertoimen poiketessa määrätystä arvosta 0,60, mitatut jäykkyysmoduulit korjattiin vastaamaan 0,60 kuormitusalakerronta kaavalla



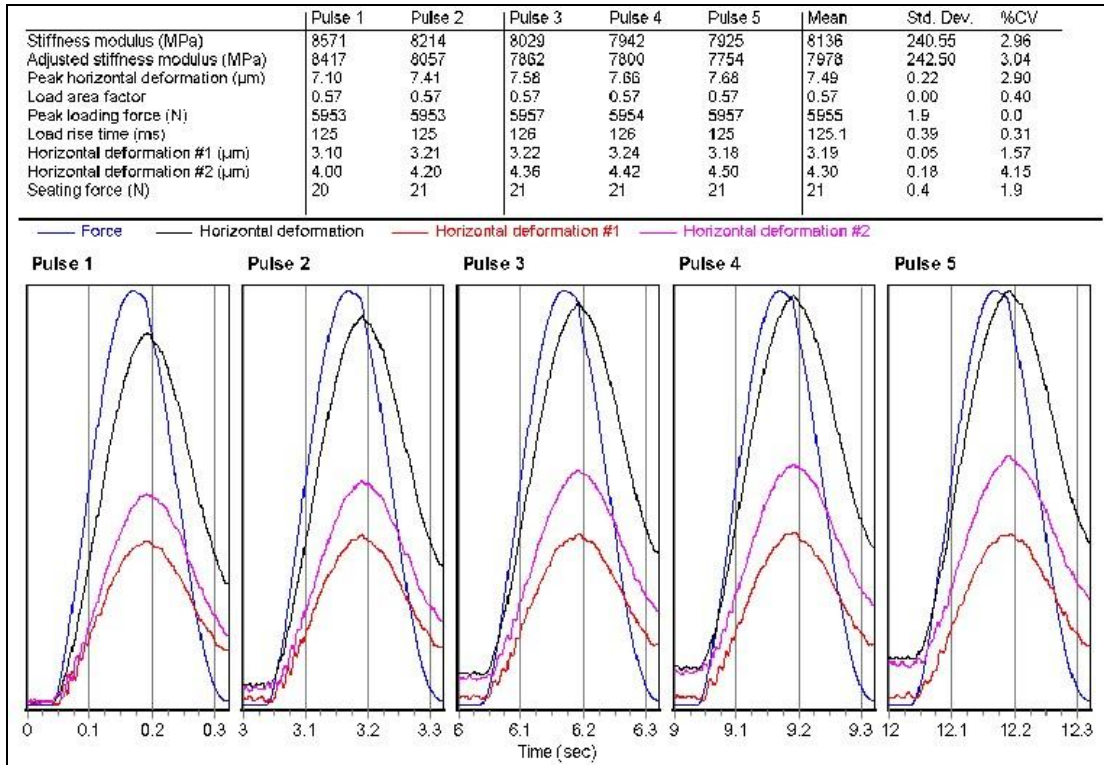
Liite E. Jäykkyysmoduulikokeen testiraportti

$$S'_m = S_m \times (1 - 0,322 \times (\log(S_m) - 1,82) \times (0,60 - k)) \quad (E.2)$$

jossa

$S'_m$  on kuormitusalakertoimeen 0,60 sovitettu jäykkyysmoduuli (MPa)  
 $k$  mitattu kuormitusalakerroin  
 $S_m$  mitattu jäykkyysmoduuli (MPa) kuormitusalakertoimella  $k$ .

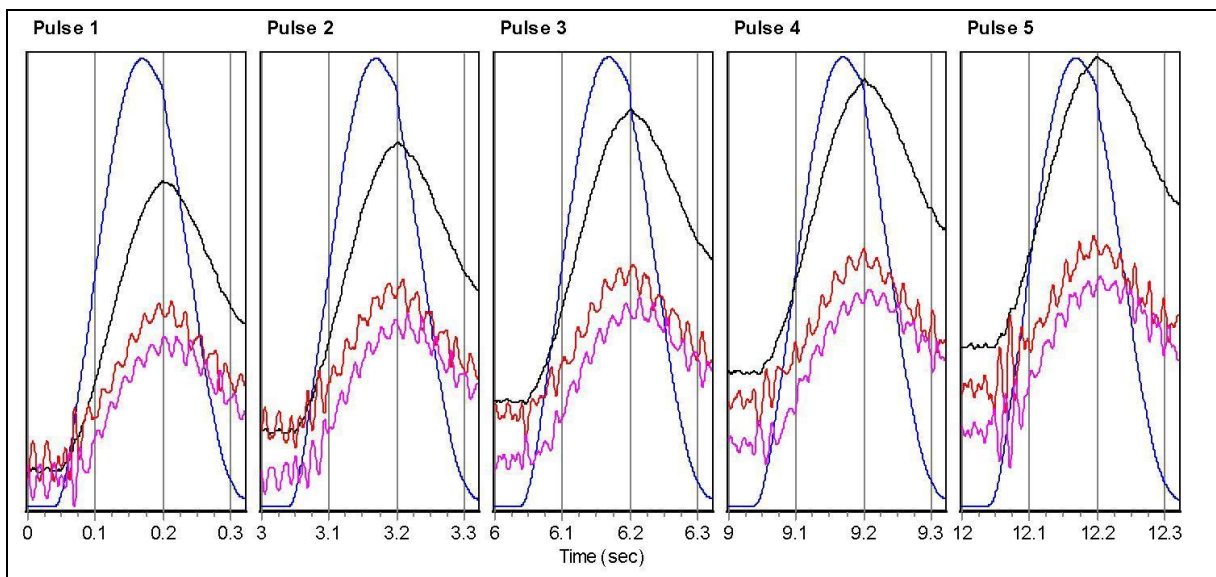
Kuvassa E-2 on esitetty testiraportti yhdestä jäykkyyskokeesta. Kyseessä on Tikkurilan linja-autoterminaalien koekappale numero 10 alemmassa testilämpötilassa. Ylemmässä sarakeessa on listattu mitattu jäykkyysmoduuli (stiffness modulus), kuormitusalakerrointa 0,60 vastaavaan korjattu jäykkyysmoduuli (adjusted stiffness modulus), vaakasuora muodonmuutoshuippu (peak horizontal deformation), kuormitusalakerroin (load area factor), kuormitushuippu (peak loading force), kuormituspulssin nousuaika (load rise time), mitatut vaakasuorat muodonmuutokset (horizontal deformation #1 & #2) sekä lepovaiheen kuormitus (seating force). Alemmassa kuvassa näkyvät mitattu voima, molempien siirtymäantureiden mittaamat vaakasuorat muodonmuutokset sekä yhteenlaskettu vaakasuora muodonmuutos ajan funktiona.



Kuva E-2. Esimerkki jäykkyyskokeen testituloksista.

Muodonmuutoshuiput vaihtelivat alemmassa testauslämpötilassa pääasiassa välillä 7 - 9  $\mu\text{m}$ , eikä alle 7  $\mu\text{m}$ :n muodonmuutoshuippuja mitattu yhdestäkään koekappaleesta. Sen sijaan korkeammassa testauslämpötilassa mitattiin yli 9  $\mu\text{m}$ :n muodonmuutoshuippuja useammastakin koekappaleesta. Testausprotokolla päätettiin kuitenkin pitää samana, koska se oli toiminut varsinaisia kokeita edeltäneissä esikokeissa. Sompasaaren koekappaleilla 4, 5 ja 6 tosin kokeiltiin alemmassa testauslämpötilassa kymmenen vakiointipulssin käyttöä muilla koekappaleilla käytetyn viiden vakiointipulssin sijaan. Ylimääräiset vakiointipulssit eivät vaikuttaneet mittaustuloksiin, mutta aiheuttivat jostain syystä standardeja pienemmät kuormituspulssien nousuajat.

Useiden koekappaleiden muodonmuutossignaaleista voidaan havaita suurtakin epätasaisuutta etenkin kuormituspulssien alussa, minkä todettiin johtuvan kuormituspalkin ja koekappaleen liikkeistä kuormitustilanteesta. Päälysteestä poratun koekappaleen sivupinnasta tulee erittäin helposti vino, mikä aiheuttaa kuormituspalkin ja koekappaleen välisen epätasaisen kosketuspinnan. Kuormituspalkki pyrkii hakeutumaan mahdollisimman tasaiselle pinnalle jokaisella pulssilla, mikä aiheuttaa häiriöliikkeitä. Kuvassa E-3 on esitetty esimerkki epätasaisesta muodonmuutossignaalista.



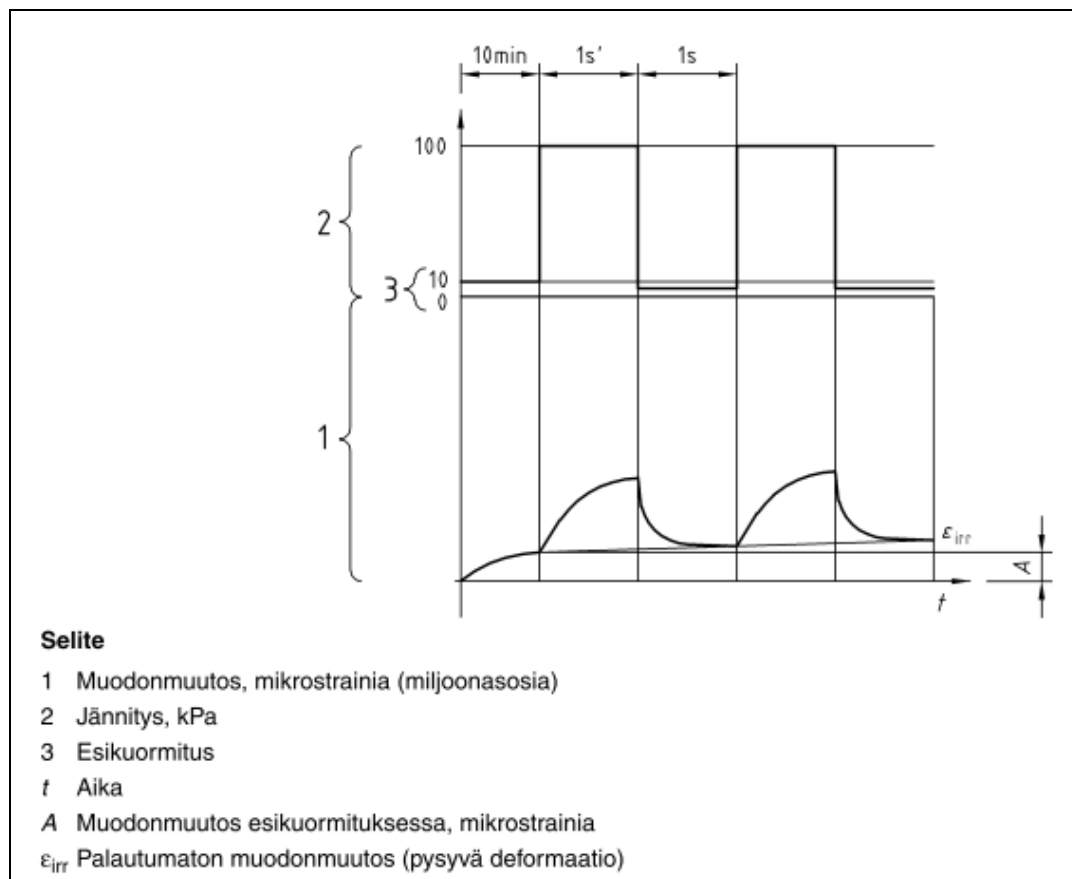
Kuva E-3. Epätasainen muodonmuutossignaali.

Molemmissa laboratoriokokeissa kohdattiin ongelmia testauslämpötilan kanssa, kun lämpökaapin lämpötila kohosi yli säädetyn lämpötilan. Lämpökaappi ei pystynyt ottamaan korvaavaa ilmaa ulkopuolelta kaapin lämpötilan laskemiseksi, koska testauslaboratorion lämpötila oli itsessään jatkuvasti noin 27 - 30 °C. Lisäksi lämpökaapin oma kompressorin on säädetty toimimaan lämpötiloissa, jotka ovat alle ulkoisen huonelämpötilan. Kompressorin käynnistämiseksi jouduttiin käyttämään esimerkiksi jääpalaa, jolla keinotekoisesti laskettiin lämpökaapin oman mittarin mittaamaa lämpötilaa. Jäykkyysmoduulikokeissa ongelmana oli lisäksi varsinaisen kokeen lyhyt kesto ja tarve avata lämpökaappia koekappaleiden vaihdon, kääntämisen ja mittaustulosten säätämisen yhteydessä. Jäykkyysmoduulikokeissa ongelmat johtivat korkeampiin testauslämpötiloihin kuin alkuperäiset tavoitteelliset lämpötilat.

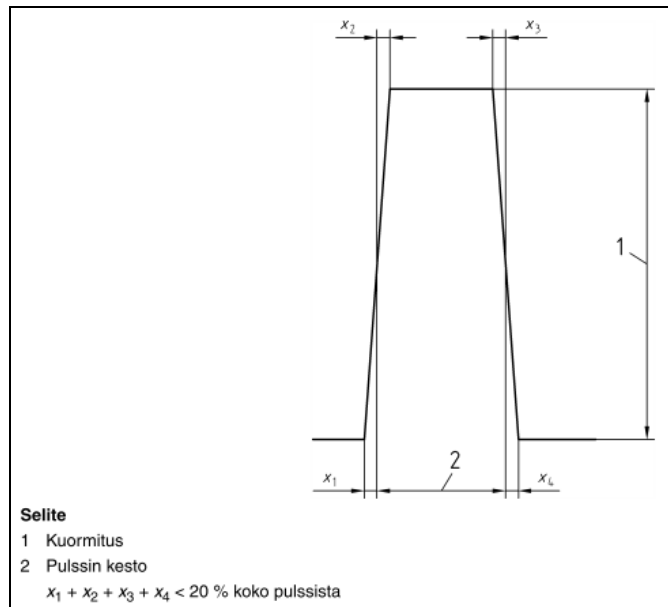
## Liite F. Jaksollisen virumiskokeen testiraportti

Kokeet suoritettiin testimenetelmällä A standardin SFS-EN 12697-25 (SFS, 2005) mukaisesti. Kuormitus koostui 10 min kestävästä esikuormituksesta ja 2 h kestävästä varsinaisesta kuormituksesta, joka koostuu jatkuvasta (seating stress) ja jaksollisesta osasta (cycling loading stress). Jännitys- ja muodonmuutoskäyrät on esitetty kuvassa F-1 ja kuormituksen yksityiskohtaisempi muoto kuvassa F-2. Standardinmukaiset kuormitusarvot olivat:

|                                     |              |
|-------------------------------------|--------------|
| Esikuormituksen kesto:              | 10 min       |
| Kuormitusjännitys:                  | 10 kPa       |
| Varsinaisen kuormituksen kesto:     | 2 h          |
| Kuormitusjännitys (seating):        | 5 kPa        |
| Kuormitusjännitys (cyclic loading): | 95 kPa       |
| Pulssin muoto (cyclic loading):     | Sakara-aalto |
| Taajuus (cyclic loading):           | 0,5 Hz       |
| Huippujännitys (seating + cyclic):  | 100 kPa      |

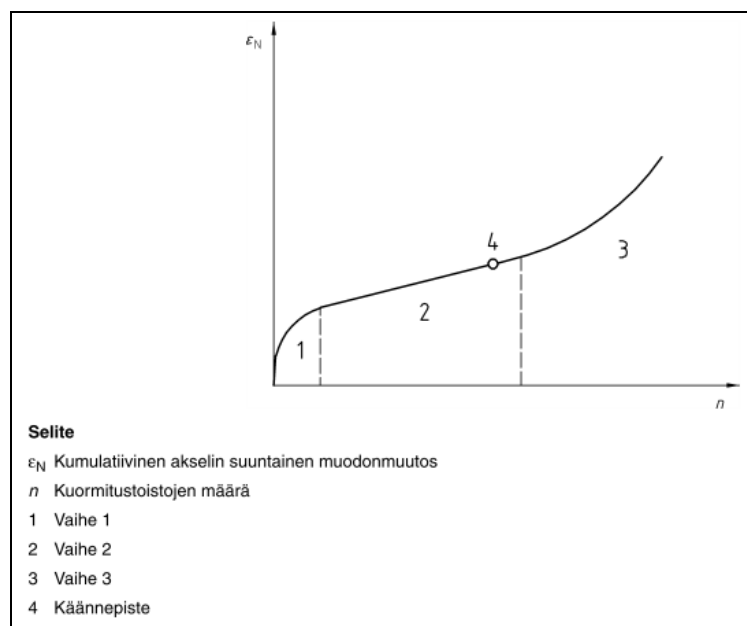


Kuva F-1. Jaksollisen virumiskokeen jännitys- ja muodonmuutoskäyrä (SFS, 2005).

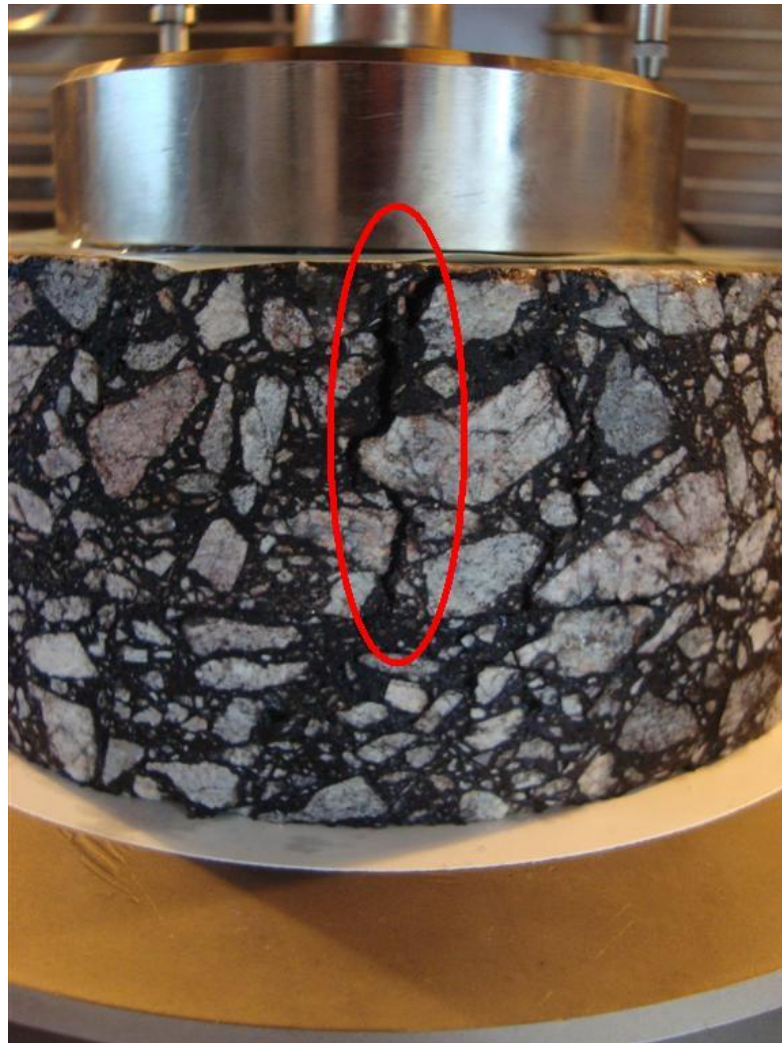


Kuva F-2. Jaksollisen virumiskokeen kuormituskäyrä (SFS, 2005).

Ennen varsinaisia kokeita suoritettiin esikokeet, joiden tarkoituksena oli tarkastaa koelaitteiston toimivuus ja kuormituspulssin muoto sekä saada aikaiseksi kuvassa F-3 esitetty täydellinen virumiskäyrä. Standardinmukaisissa virumiskokeissa käännepistettä ja virumiskäyrän kolmatta vaihetta ei kuitenkaan saavutettu, vaikka joitakin koekappaleita kuormitettiin jopa 30 000 kertaa. Kunnollinen virumiskäyrä saatiin kuitenkin sattumalta aikaiseksi, koska ensimmäisessä esikokeessa käytettiin liian suurta kuormitusta. Ohjelman lähtötiedoiksi annettiin koekappaleen todellinen halkaisija 150 mm, mutta kuormitus lasketaan kuormituslevyn 96 mm halkaisijan perusteella. Kuormitusvoima oli noin 2,4-kertainen standardinmukaiseen verrattuna ja aiheutti koekappaleeseen kuvassa F-4 näkyvän halkeaman, joka läpäisi ylemmän päällystekerroksen.



Kuva F-3. Virumiskäyrä (SFS, 2005).



Kuva F-4. Haljennut virumiskokeen testikappale.

Molemmissa laboratoriokokeissa kohdattiin ongelmia testauslämpötilan kanssa, kun lämpökaapin lämpötila kohosi yli säädetyn lämpötilan. Lämpökaappi ei pystynyt ottamaan korvaavaa ilmaa ulkopuolelta kaapin lämpötilan laskemiseksi, koska testauslaboratorion lämpötila oli itsessään jatkuvasti noin 27 - 30 °C. Lisäksi lämpökaapin oma kompressorin on säädetty toimimaan lämpötiloissa, jotka ovat alle ulkoisen huonelämpötilan. Kompressorin käynnistämiseksi jouduttiin käyttämään esimerkiksi jääpalaa, jolla keinotekoisesti laskettiin lämpökaapin oman mittarin mittamaa lämpötilaa. Virumiskoe on kestoltaan jäykkyyskoetta huomattavasti pidempi, joten lämpökaapin oven säännöllinen avaaminen ei tässä kokeessa ollut tarpeellista. Korvaavan ilman puutteen takia lämpötila kaapissa kohosi kuitenkin yli standardinmukaisen testauslämpötilan jopa 45 °C:een.

Liite G. Pudotuspainomittausten taipumien lämpötilakorjauskaavat (Spoof & Petäjä, 2000a)

Päällysteen lämpötilan laskeminen:

$$t_{\text{päällyste}} = 7,07 + 0,564 \times t_{\text{pinta}} - 0,0017 \times h_{\text{päällyste}} \quad (\text{F.1})$$

jossa

$t_{\text{päällyste}}$  on päällysteen keskimääräinen lämpötila (°C)  
 $t_{\text{pinta}}$  tien pinnan lämpötila (°C)  
 $h_{\text{päällyste}}$  päällysteen paksuus (mm).

Korjauskertoimien laskenta:

$$k_{\text{d0}} = 1 - (t_{\text{päällyste}} - 20) \times (0,0000975 \times h_{\text{päällyste}}) \quad (\text{F.2})$$

$$k_{\text{d200}} = 1 - (t_{\text{päällyste}} - 20) \times (0,0000598 \times h_{\text{päällyste}}) \quad (\text{F.3})$$

$$k_{\text{d0}} = 1 - (t_{\text{päällyste}} - 20) \times (0,0000517 \times h_{\text{päällyste}}) \quad (\text{F.4})$$

$$k_{\text{d0}} = 1 - (t_{\text{päällyste}} - 20) \times (0,0000476 \times h_{\text{päällyste}}) \quad (\text{F.5})$$

$$k_{\text{d0}} = 1 - (t_{\text{päällyste}} - 20) \times (0,0000408 \times h_{\text{päällyste}}) \quad (\text{F.6})$$

joissa

$k_{\text{dx}}$  on korjauskerroin taipumalle d etäisyydellä x (mm)  
 $t_{\text{päällyste}}$  päällysteen keskimääräinen lämpötila (°C)  
 $h_{\text{päällyste}}$  päällysteen paksuus (mm).

Lämpötilakorjattujen taipumien laskenta:

$$d_{\text{x20}} = k \times d_{\text{t}} \quad (\text{F.7})$$

jossa

$d_{\text{x20}}$  on taipuma etäisyydellä x kuormituslevystä lämpötilassa 20 °C  
 $k$  korjauskerroin taipumalle etäisyydellä x  
 $d_{\text{t}}$  taipuma mittauslämpötilassa etäisyydellä x.

### Pohjamaan jäykkyysmoduuli (Stubstad ym., 2006)

Pohjamaan jäykkyysmoduulin suoralaskenta perustuu Hoggin (1944) kehittämään laskentateoriaan ja siitä myöhemmin pudotuspainomittauksia varten kehitettyyn teoriaan (Wiseman & Greenstein, 1983). Hoggin laskentateoria perustuu kaksikerrosmalliin, jossa ohut jäykkä levy mallinnetaan elastiselle perustukselle. Pohjamaan jäykkyysmoduuli lasketaan kuormituslevyn keskeltä mitatun ja erikseen laskennallisesti määritettävän etäisyyden  $r_{50}$  taipuman perusteella. Hoggin mukaan sopiva etäisyys  $r_{50}$  on se, jossa taipuma on puolet kuormituslevyn keskeltä mitatusta taipumasta. Etäisyys  $r_{50}$  määritetään laskennallisesti valitulla etäisyydellä  $r$  olevan taipumamittausanturin taipuman perusteella. Hogg on ottanut teoriassaan huomioon vaihtelut päällystepaksuudessa sekä päällysteen ja pohjamaan moduulien suhteissa, jotka ovat tärkeimmät vaikuttavat tekijät etäisyyden  $r_{50}$  määräytymisessä.

$$E_0 = I \times \frac{(1 + \nu) \times (3 - 4 \times \nu)}{2 \times (1 - \nu)} \times \left( \frac{S_0}{S} \right) \times \left( \frac{p}{\Delta_0 \times l} \right) \text{ Pohjamaan jäykkyysmoduuli} \quad (\text{H.1})$$

$$r_{50} = r \times \frac{\left( \frac{1}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} - B}{\left[ \frac{1}{\alpha} \times \left( \frac{\Delta_0}{\Delta_r} - 1 \right)^{\frac{1}{\beta}} \right] - B} \text{ Etäisyys } r_{50} \quad (\text{H.2})$$

$$l = y_0 \times \frac{r_{50}}{2} + \sqrt{(y_0 \times r_{50})^2 - 4 \times m \times a \times r_{50}} \text{ Taipumasuppilon ominaispituus} \quad (\text{H.3})$$

$$\text{Jos laskettu } \frac{a}{l} < 0,2, \text{ määritetään ominaispituus kaavalla } l = (y_0 - 0,2 \times m) \times r_{50} \quad (\text{H.4})$$

$$\left( \frac{S_0}{S} \right) = 1 - \overline{m} \times \left( \frac{a}{l} - 0,2 \right) \text{ Päällysteen pistekuormajäykkyyden ja jäykkyyden suhde} \quad (\text{H.5})$$

$$\text{Jos laskettu } \frac{a}{l} < 0,2, \text{ annetaan suhteelle arvo } \left( \frac{S_0}{S} \right) = 1,0$$

|            |   |
|------------|---|
| $E_0$      | on pohjamaan jäykkyysmoduuli (MPa)                                |
| $\nu$      | pohjamaan Poisson-luku (-)  |
| $S_0$      | päällysteen teoreettinen jäykkyys pistekuormalle (MPa)            |
| $S$        | päällysteen jäykkyys, $p / \Delta_0$ (MPa)                        |
| $p$        | kuormitusjännitys (N)   |
| $\Delta_0$ | taipuma kuormituslevyn keskellä (mm)                              |
| $\Delta_r$ | taipuma etäisyydellä $r$ kuormituslevystä (mm)                    |
| $r$        | taipumamittausanturin etäisyys kuormituslevystä (mm)              |
| $r_{50}$   | etäisyys kuormituslevystä, jossa $\Delta_r / \Delta_0 = 0,5$ (mm) |

|                |  |
|----------------|--|
| a              | kuormituslevyn säde (mm)   |
| l              | taipumasuppilon ominaispituus (characteristic length) (mm)                       |
| h              | etäisyys kovaan pohjaan (mm)   |
| I              | vakiotekijä (influence factor), tässä tutkimuksessa 0,1689 (-)                   |
| $y_0$          | taipumasuppilon ominaispituuteen liittyvä kerroin, tässä tutkimuksessa 0,603 (-) |
| $\overline{m}$ | taipumasuppilon ominaispituuteen liittyvä kerroin, tässä tutkimuksessa 0,108 (-) |
| $\overline{m}$ | jäykkyysuhteeseen $S_0 / S$ liittyvä kerroin, tässä tutkimuksessa 0,208 (-).     |
| $\alpha$       | taipumasuppilon sovitukseen liittyvä kerroin (-)                                 |
| $\beta$        | taipumasuppilon sovitukseen liittyvä kerroin (-)                                 |
| B              | taipumasuppilon sovitukseen liittyvä kerroin (-)                                 |

Kun  $\Delta_r / \Delta_0 > 0,43$                        $\alpha = 0,3804$ ,                       $\beta = 1,8246$                        $B = 0,0$

Kun  $\Delta_r / \Delta_0 < 0,43$                        $\alpha = 4,3795 \times 10^{-4}$                        $\beta = 4,9903$                        $B = 3,0$

### Päällysteen jäykkyysmoduuli (Stubstad ym., 2006)

Sidotun päällystekerroksen jäykkyysmoduulin laskenta perustuu kokonaiskantavuuteen ja taipumasuppilon alle jäävään pinta-alaan 305 mm ulospäin kuormituksen keskipisteestä. Suoralaskentaa varten kehitettiin AREA-menetelmä, jolla kokonaiskantavuus voitiin muuntaa päällysteen jäykkyysmoduuliksi. Laskentatapa on jaettu erikseen jäykille betonipäällysteille ja joustaville asfalttipäällysteille, joista tässä tutkimuksessa käsitellään ainoastaan jälkimmäistä. AREA-menetelmässä määritetään ensin taipumasuppilon alle jäävä pinta-ala  $A_{12}$  305 mm ulospäin kuormituslevyn keskipisteestä. Alaindeksi tarkoittaa 12 tuumaa eli 305 mm:ä. Laskennassa käytetään taipumia etäisyyksillä 0, 203 ja 305 mm kuormituslevystä.

Suoralaskentamenetelmän kehittämiseksi tehtiin koelaskentoja CHEVLAY2 -monikerroslaskentaohjelmalla, jolla määritettiin  $A_{12}$  arvo kaikkien rakennekerrosten moduulien ollessa samoja. Lopulta päädyttiin arvoon 6,85, kun kallion pinnan oletettiin olevan lähellä ja muuten arvoon 6,91. Arvon 6,85 katsottiin olevan pienin mahdollinen  $A_{12}$ -arvo, koska siinä päällysteen jäykkyys on sama kuin alempien kerrosten. Vastaavasti  $A_{12}$  saa suurimman arvonsa 12, kun kaikki kolme taipumaa ovat yhtä suuria. Tällaisessa tapauksessa päällystekerros on äärettömän jäykkä. Taipumasuppilosta määritettävää  $A_{12}$ -arvoa sekä sen minimi- ja maksimi-arvoja käytetään AREA-kertoimen määrittämiseen. Tämän jälkeen päällysteen jäykkyysmoduuli lasketaan CHEVLAY2-laskentojen perusteella empiirisesti määritetyllä kaavalla, jossa lähtöarvoina ovat kokonaiskantavuus, AREA-kerroin sekä päällystekerroksen paksuus.

Kokonaiskantavuuden laskentakaavassa H.6 kerroin 1,5 vastaa Poisson-luvun arvoa 0,5. Useimmilla rakennemateriaaleilla Poisson-luku on pienempi kuin 0,5, mutta jäykän kuormituslevyn aiheuttama epätasainen kuormitus vastaavasti korjaa tätä vääristymää oikeaan suuntaan.



$$E_0 = \frac{1,5 \times a \times \sigma_0}{d_0} \text{ Kokonaiskantavuus} \quad (\text{H.6})$$

$$A_{12} = 2 \times \left[ 2 + 3 \times \left( \frac{d_8}{d_0} \right) + \left( \frac{d_{12}}{d_0} \right) \right] \text{ Taipumasuppilon alle jäävä pinta-ala (0 - 305 mm)} \quad (\text{H.7})$$

$$AF = \left[ \frac{k_2 - 1}{k_2 - \left( \frac{A_{12}}{k_1} \right)} \right]^{1,35} \text{ AREA-kerroin} \quad (\text{H.8})$$

$$E = \left( \frac{E_0 \times AF \times k_3^{1/AF}}{k_3^2} \right) \text{ Päällysteen jäykkyysmoduuli} \quad (\text{H.9})$$

|            |   |
|------------|---|
| $E_0$      | on kokonaiskantavuus (MPa)  |
| $a$        | kuormituslevyn säde (mm)  |
| $\sigma_0$ | kuormitusjännitys levyn alla (N)  |
| $d_0$      | taipuma kuormituslevyn alla (mm)  |
| $d_8$      | taipuma 203 mm (8 tuumaa) etäisyydellä kuormituslevystä                           |
| $d_{12}$   | taipuma 305 mm (12 tuumaa) etäisyydellä kuormituslevystä                          |
| $A_{12}$   | taipumasuppilon alle jäävä pinta-ala välillä 0 - 305 mm (12 tuumaa) (-)           |
| $AF$       | AREA-kerroin (-)  |
| $E$        | päällysteen jäykkyysmoduuli (MPa)   |
| $k_1$      | taipumasuppilon alle jäävä minimipinta-ala. Tässä tutkimuksessa 6,85 (-)          |
| $k_2$      | maksimipinta-alan 12 ja minimipinta-alan suhde. Tässä tutkimuksessa 1,752 (-)     |
| $k_3$      | päällystekerroksen paksuuden ja kuormituslevyn halkaisijan suhde, $h_1 / 2a$ (-). |

#### Rakennekerrosten jäykkyysmoduuli (Stubstad ym., 2006)

FHWA:n mukaan rakennekerrosten jäykkyysmoduulit voidaan laskea joko takaisinlaskennalla (pseudobackcalculation) tai pohjamaan jäykkyysmoduulin perusteella (Dorman & Metcalf -menetelmä) Kaavan H.10 mukainen suhde on kuitenkin yleisesti käytössä päällekkäisten sitomattomien rakennekerrosten jäykkyysmoduulien suhteelle (Järvinen, 1991b).

$$M_r = 0,2 \times h^{0,45} \times M_{r\_pohja} \quad (\text{H.10})$$

jossa

|                |  |
|----------------|--|
| $M_r$          | on rakennekerroksen jäykkyysmoduuli (MPa)      |
| $h$            | rakennekerroksen paksuus (mm)                  |
| $M_{r\_pohja}$ | pohjamaan suoralaskettu jäykkyysmoduuli (MPa). |

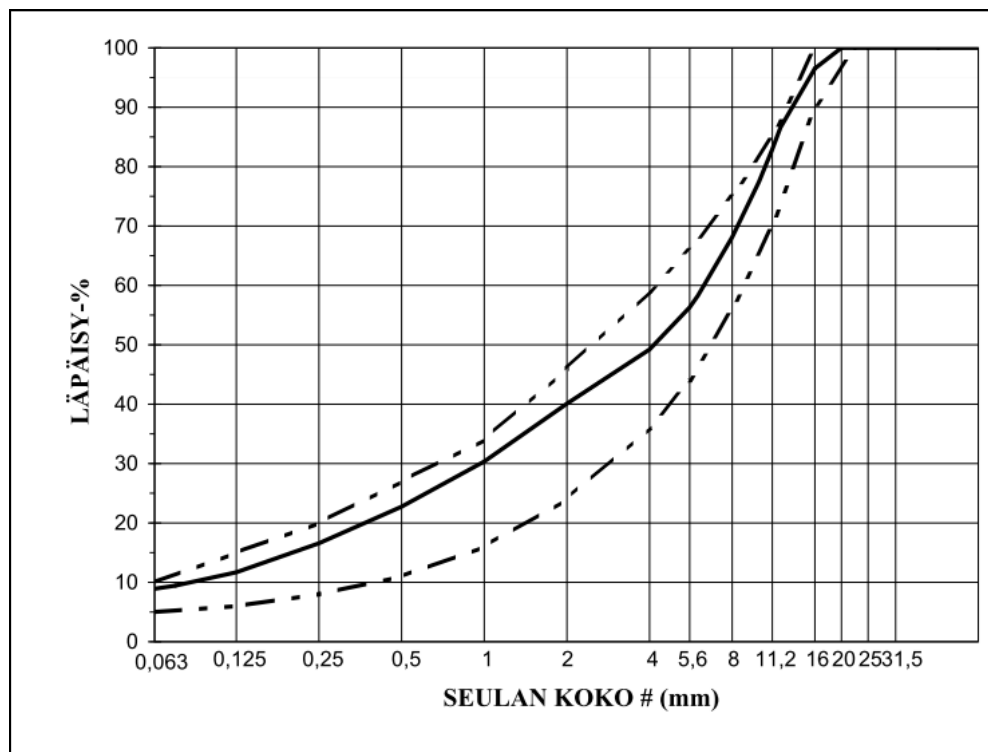
Liite I.1 Koekappaleiden halkaisijat ja korkeudet

| Koekohde ja koekappale | Halkaisijat [mm] |        |        |               | Korkeudet [mm] |       |       |       |              |
|------------------------|------------------|--------|--------|---------------|----------------|-------|-------|-------|--------------|
|                        | d1               | d2     | d3     | Keskiarvo     | d1             | d2    | d3    | d4    | Keskiarvo    |
| <b>Jätkäsaari:</b>     |                  |        |        |               |                |       |       |       |              |
| Koekappale 1           | 150,79           | 151,24 | 151,30 | <b>151,11</b> | 60,22          | 60,44 | 60,97 | 60,40 | <b>60,51</b> |
| Koekappale 2           | 150,03           | 149,60 | 149,57 | <b>149,73</b> | 60,33          | 60,26 | 60,35 | 60,37 | <b>60,33</b> |
| Koekappale 3           | 149,21           | 149,25 | 149,19 | <b>149,22</b> | 60,31          | 60,46 | 60,22 | 60,65 | <b>60,41</b> |
| Koekappale 4           | 149,32           | 148,84 | 149,07 | <b>149,08</b> | 60,42          | 60,67 | 60,78 | 60,86 | <b>60,68</b> |
| Koekappale 5           | 149,65           | 149,25 | 149,63 | <b>149,51</b> | 60,42          | 60,46 | 60,97 | 60,43 | <b>60,57</b> |
| Koekappale 6           | 149,87           | 150,01 | 150,64 | <b>150,17</b> | 60,57          | 60,49 | 60,53 | 60,69 | <b>60,57</b> |
| <b>Sompasaari:</b>     |                  |        |        |               |                |       |       |       |              |
| Koekappale 1           | 145,40           | 145,85 | 145,45 | <b>145,57</b> | 60,53          | 60,34 | 60,08 | 60,43 | <b>60,35</b> |
| Koekappale 2           | 144,78           | 144,57 | 144,67 | <b>144,67</b> | 60,55          | 60,44 | 60,59 | 60,15 | <b>60,43</b> |
| Koekappale 3           | 145,60           | 145,01 | 144,55 | <b>145,05</b> | 60,34          | 60,43 | 60,55 | 60,79 | <b>60,53</b> |
| Koekappale 4           | 149,53           | 148,96 | 148,98 | <b>149,16</b> | 60,11          | 59,96 | 60,13 | 60,28 | <b>60,12</b> |
| Koekappale 5           | 150,11           | 149,65 | 150,06 | <b>149,94</b> | 59,74          | 60,37 | 60,23 | 60,32 | <b>60,17</b> |
| Koekappale 6           | 149,10           | 148,88 | 148,77 | <b>148,92</b> | 60,32          | 60,00 | 60,48 | 60,16 | <b>60,24</b> |
| Koekappale 7           | 149,43           | 148,90 | 149,38 | <b>149,24</b> | 60,23          | 60,34 | 60,46 | 60,43 | <b>60,37</b> |
| <b>Tikkurila:</b>      |                  |        |        |               |                |       |       |       |              |
| Koekappale 1           | 148,90           | 148,05 | 148,84 | <b>148,60</b> | 60,62          | 60,20 | 60,06 | 60,13 | <b>60,25</b> |
| Koekappale 2           | 148,95           | 148,89 | 148,80 | <b>148,88</b> | 60,13          | 60,72 | 60,05 | 60,54 | <b>60,36</b> |
| Koekappale 3           | 149,61           | 149,39 | 149,53 | <b>149,51</b> | 60,23          | 60,13 | 60,10 | 60,67 | <b>60,28</b> |
| Koekappale 4           | 148,99           | 149,19 | 149,25 | <b>149,14</b> | 60,85          | 60,39 | 60,46 | 60,42 | <b>60,53</b> |
| Koekappale 5           | 149,19           | 150,06 | 149,49 | <b>149,58</b> | 60,35          | 60,16 | 60,20 | 59,79 | <b>60,13</b> |
| Koekappale 6           | 149,19           | 149,19 | 149,03 | <b>149,14</b> | 60,91          | 61,05 | 60,88 | 61,42 | <b>61,07</b> |
| Koekappale 7           | -                | -      | -      | -             | -              | -     | -     | -     | -            |
| Koekappale 8           | 149,77           | 149,40 | 149,39 | <b>149,52</b> | 60,29          | 60,60 | 60,25 | 60,68 | <b>60,46</b> |
| Koekappale 9           | 148,99           | 148,65 | 148,64 | <b>148,76</b> | 60,17          | 60,40 | 60,56 | 60,18 | <b>60,33</b> |
| Koekappale 10          | 148,87           | 149,31 | 149,14 | <b>149,11</b> | 60,60          | 60,66 | 60,60 | 60,74 | <b>60,65</b> |
| Koekappale 11          | 149,52           | 149,69 | 149,49 | <b>149,57</b> | 60,50          | 60,64 | 60,14 | 60,27 | <b>60,39</b> |
| Koekappale 12          | 149,69           | 150,24 | 150,19 | <b>150,04</b> | 60,22          | 60,01 | 59,96 | 59,85 | <b>60,01</b> |

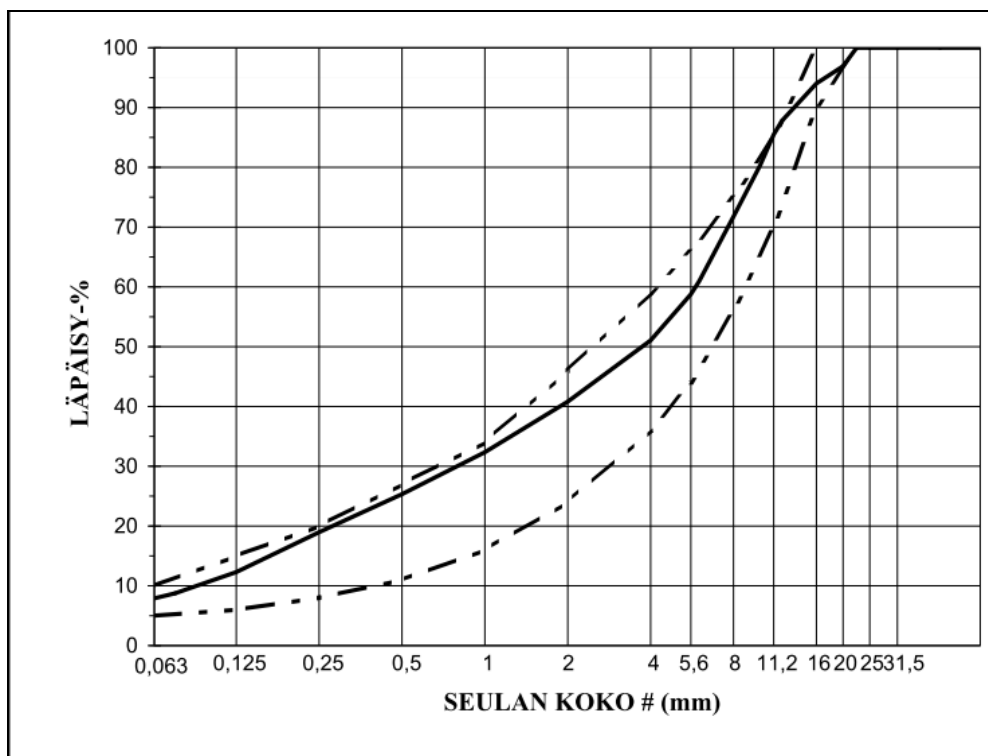
Liite I.2 Koekappaleiden massat ilmassa ja vedessä, kappaletiheudet, asfalttimassan maksimitiheudet ja tyhjätilat

| Koekohde ja koekappale | Massa ilmassa [g] | Massa vedessä [g] | Kappaletiheys [g / cm <sup>3</sup> ] | Asfalttimassan maksimitiheys [g / cm <sup>3</sup> ] | Tyhjätila [%] |
|------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------------|---|---------------|
| <b>Jätkäsaari:</b>     |                   |                   |                                      |   |               |
| Koekappale 1           | 2556,9            | 1499,4            | 2,4179                               | 2,4246  | 0,28          |
| Koekappale 2           | 2544,0            | 1501,0            | 2,4391                               | 2,4584  | 0,78          |
| Koekappale 3           | 2560,7            | 1520,4            | 2,4615                               | 2,4904  | 1,16          |
| Koekappale 4           | 2500,6            | 1462,6            | 2,4091                               | -   | -             |
| Koekappale 5           | 2486,2            | 1450,0            | 2,3993                               | -   | -             |
| Koekappale 6           | 2490,6            | 1452,8            | 2,3999                               | -   | -             |
| <b>Sompasaari:</b>     |                   |                   |                                      |   |               |
| Koekappale 1           | 2384,2            | 1395,3            | 2,4110                               | -   | -             |
| Koekappale 2           | 2390,5            | 1411,8            | 2,4425                               | -   | -             |
| Koekappale 3           | 2372,2            | 1392,2            | 2,4206                               | -   | -             |
| Koekappale 4           | 2506,9            | 1468,1            | 2,4133                               | 2,4252  | 0,49          |
| Koekappale 5           | 2503,2            | 1465,8            | 2,4130                               | 2,4199  | 0,29          |
| Koekappale 6           | 2464,6            | 1432,1            | 2,3870                               | 2,4467  | 2,44          |
| Koekappale 7           | 2473,8            | 1437,5            | 2,3871                               | 2,4339  | 1,92          |
| <b>Tikkurila:</b>      |                   |                   |                                      |   |               |
| Koekappale 1           | 2458,8            | 1446,1            | 2,4280                               | 2,4671  | 1,59          |
| Koekappale 2           | 2508,2            | 1481,5            | 2,4430                               | 2,5210  | 3,10          |
| Koekappale 3           | 2533,2            | 1498,0            | 2,4471                               | 2,4618  | 0,60          |
| Koekappale 4           | 2531,5            | 1498,3            | 2,4502                               | 2,4897  | 1,59          |
| Koekappale 5           | 2566,9            | 1526,6            | 2,4675                               | 2,5029  | 1,42          |
| Koekappale 6           | 2598,1            | 1554,5            | 2,4896                               | 2,5160  | 1,05          |
| Koekappale 7           | -                 | -                 | -                                    | -   | -             |
| Koekappale 8           | 2541,1            | 1499,6            | 2,4398                               | -   | -             |
| Koekappale 9           | 2542,0            | 1506,6            | 2,4551                               | -   | -             |
| Koekappale 10          | 2535,9            | 1499,5            | 2,4468                               | -   | -             |
| Koekappale 11          | 2534,9            | 1496,7            | 2,4416                               | 2,4946  | 2,12          |
| Koekappale 12          | 2565,4            | 1525,1            | 2,4660                               | 2,4899  | 0,96          |

Liite I.3 Päällystekiviaineksen rakeisuuskäyrät

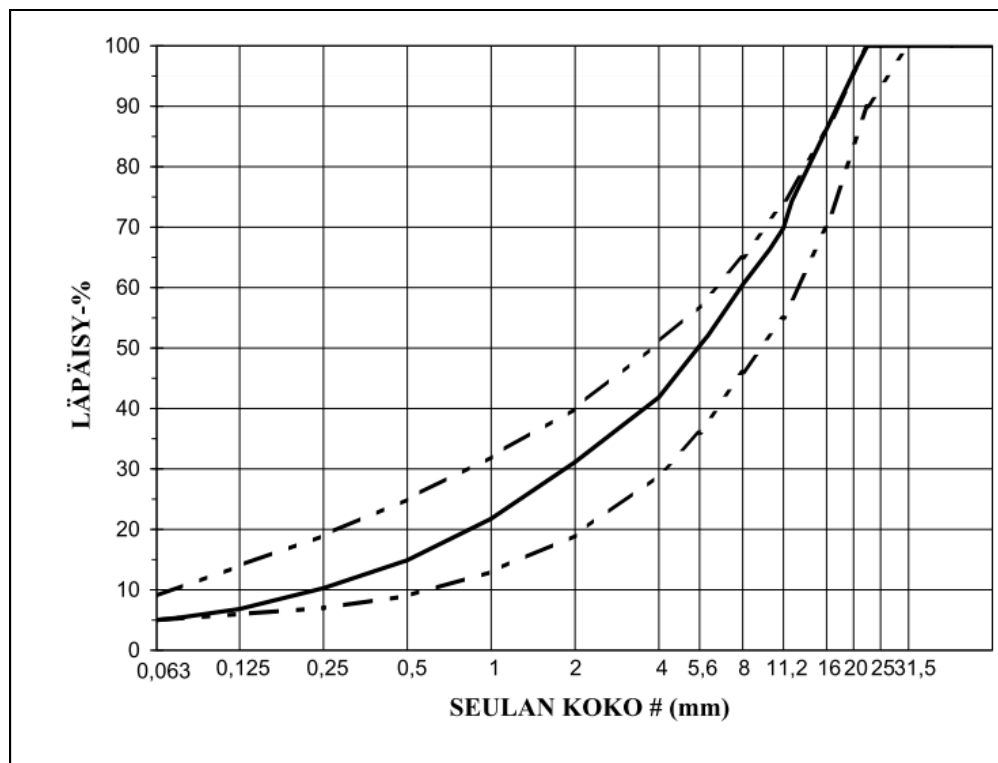


Kuva I.3-1 Päällystekiviaineksen rakeisuuskäyrä ja AB16:n Asfalttinormien (PANK, 2007) mukaiset ylä- ja alarajat - Jätkäsaari, koekappale 1.

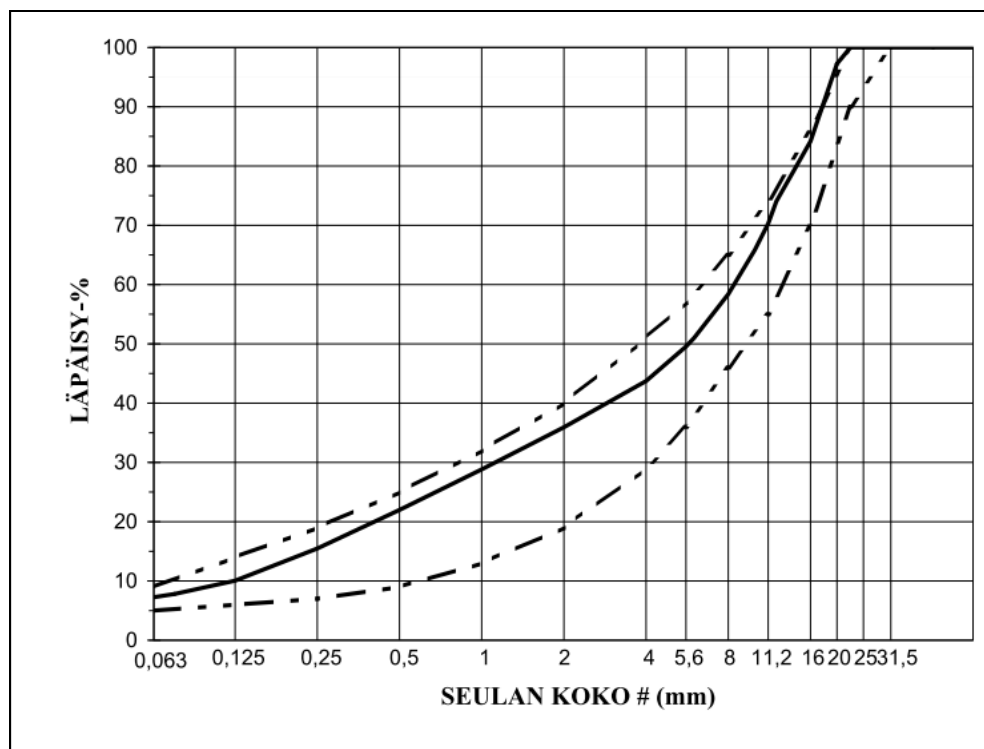


Kuva I.3-2 Päällystekiviaineksen rakeisuuskäyrä ja AB16:n Asfalttinormien (PANK, 2007) mukaiset ylä- ja alarajat - Sompasaari, koekappale 4.

Liite I.3 Päälystekiviaineksen rakeisuuskäyrät

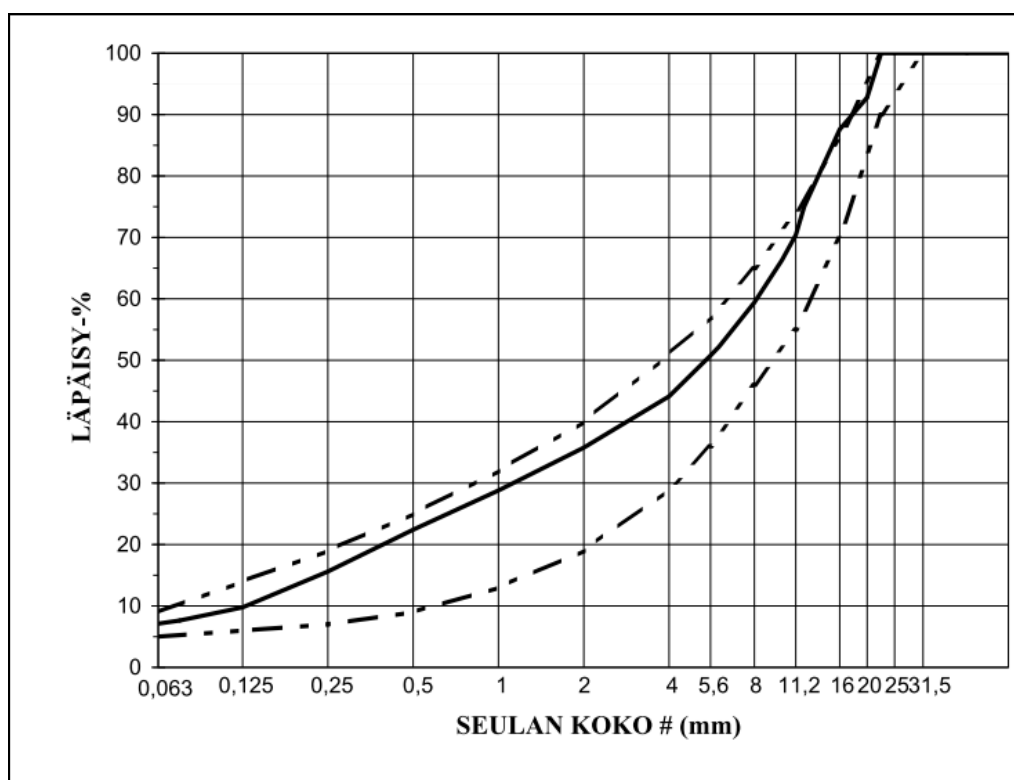


Kuva I.3-3 Päälystekiviaineksen rakeisuuskäyrä ja AB22:n Asfalttinormien (PANK, 2007) mukaiset ylä- ja alarajat - Tikkurilan linja-autoterminaali, koekappale 2.



Kuva I.3-4 Päälystekiviaineksen rakeisuuskäyrä ja AB22:n Asfalttinormien (PANK, 2007) mukaiset ylä- ja alarajat - Tikkurilan linja-autoterminaali, koekappale 4.

Liite I.3 Päälystekiviaineksen rakeisuuskäyrät



Kuva I.3-5 Päälystekiviaineksen rakeisuuskäyrä ja AB22:n Asfalttinormien (PANK, 2007) mukaiset ylä- ja alarajat - Tikkurilan linja-autoterminaali, koekappale 5.

Liite I.4 Sideainepitoisuudet, sideaineen tunkeumat ja pehmenemispisteet

| Koekohde ja koekappale | Sideainepitoisuus |        | Tunkeuma [1 / 10 mm] |     |     |            | Pehmenemispiste [°C] |      |              |
|------------------------|-------------------|--------|----------------------|-----|-----|------------|----------------------|------|--------------|
|                        | Massa-%           | Til.-% | 1                    | 2   | 3   | Keskiarvo  | 1                    | 2    | Keskiarvo    |
| <b>Jätkäsaari</b>      |                   |        |                      |     |     |            |                      |      |              |
| Koekappale 1           | 5,4               | 7,6    | 66                   | 65  | 63  | <b>65</b>  | 46,5                 | 47,1 | <b>46,8</b>  |
| <b>Sompasaari</b>      |                   |        |                      |     |     |            |                      |      |              |
| Koekappale 4           | 5,7               | 8,6    | 78                   | 78  | 82  | <b>79</b>  | 46,0                 | 46,7 | <b>46,4</b>  |
| <b>Tikkurila:</b>      |                   |        |                      |     |     |            |                      |      |              |
| Koekappale 2           | 4,7               | 7,4    | 39                   | 41  | 42  | <b>41</b>  | 57,2                 | 57,2 | <b>57,2</b>  |
| Koekappale 4           | 5,4               | 8,6    | 83                   | 81  | 85  | <b>83</b>  | 47,8                 | 47,9 | <b>47,8*</b> |
| Koekappale 5           | 5,2               | 8,1    | 106                  | 111 | 109 | <b>109</b> | 42,6                 | 42,9 | <b>42,8</b>  |

\* pyöristetty tarkkuudella 0,2 standardin EN 1427 (CEN, 2007b) mukaisesti

Liite I.5 Jäykkyysmoduulit matalammassa testilämpötilassa

| Koekohde ja koekappale | Jäykkyysmoduuli [MPa] |       |              | Lämpötila [°C] |      |           |
|------------------------|-----------------------|-------|--------------|----------------|------|-----------|
|                        | 1                     | 2     | Keskiarvo    | 1              | 2    | Keskiarvo |
| <b>Jätkäsaari:</b>     |                       |       |              |                |      |           |
| Koekappale 1           | 4756                  | 4100  | <b>4100</b>  | 14,4           | 13,4 | 13,7      |
| Koekappale 2           | 5280                  | 5048  | <b>5164</b>  | 13,4           | 13,4 | 13,4      |
| Koekappale 3           | 5790                  | 5551  | <b>5671</b>  | 13,3           | 13,7 | 13,5      |
| Koekappale 4           | 4029                  | 3326  | <b>3678</b>  | 13,9           | 14,0 | 13,9      |
| Koekappale 5           | 4859                  | 3935  | <b>4397</b>  | 14,0           | 14,1 | 14,0      |
| Koekappale 6           | 4154                  | 3797  | <b>3976</b>  | 14,0           | 14,2 | 14,1      |
| <b>Sompasaari:</b>     |                       |       |              |                |      |           |
| Koekappale 1           | -                     | -     | -            | -              | -    | -         |
| Koekappale 2           | -                     | -     | -            | -              | -    | -         |
| Koekappale 3           | -                     | -     | -            | -              | -    | -         |
| Koekappale 4           | 3590                  | 3351  | <b>3471</b>  | 11,6           | 12,5 | 12,1      |
| Koekappale 5           | 4239                  | 3110  | <b>3675</b>  | 13,0           | 13,5 | 13,2      |
| Koekappale 6           | 6099                  | 5102  | <b>5601</b>  | 13,2           | 13,4 | 13,3      |
| Koekappale 7           | 4160                  | 3818  | <b>3989</b>  | 13,2           | 13,3 | 13,3      |
| <b>Tikkurila:</b>      |                       |       |              |                |      |           |
| Koekappale 1           | 5914                  | 5353  | <b>5634</b>  | 11,0           | 12,1 | 11,5      |
| Koekappale 2           | 8316                  | 7497  | <b>7907</b>  | 12,7           | 13,2 | 12,9      |
| Koekappale 3           | 6234                  | 4820  | <b>5527</b>  | 13,6           | 13,7 | 13,6      |
| Koekappale 4           | 5372                  | 4962  | <b>5167</b>  | 13,7           | 13,8 | 13,8      |
| Koekappale 5           | 6088                  | 4816  | <b>5452</b>  | 13,9           | 13,7 | 13,8      |
| Koekappale 6           | 8772                  | 6156  | <b>7464</b>  | 13,8           | 13,9 | 13,8      |
| Koekappale 7           | -                     | -     | -            | -              | -    | -         |
| Koekappale 8           | 4966                  | 3406  | <b>4186</b>  | 12,9           | 14,1 | 13,5      |
| Koekappale 9           | 11551                 | 10573 | <b>11062</b> | 14,0           | 14,0 | 14,0      |
| Koekappale 10          | 7978                  | 7094  | <b>7536</b>  | 14,0           | 14,1 | 14,1      |
| Koekappale 11          | 7152                  | 6971  | <b>7062</b>  | 13,6           | 13,9 | 13,7      |
| Koekappale 12          | 5506                  | 4331  | <b>4919</b>  | 14,0           | 14,2 | 14,1      |

Liite I.6 Jäykkyysmoduulit korkeammassa testilämpötilassa

| Koekohde ja koekappale | Jäykkyysmoduuli [MPa] |      |             | Lämpötila [°C] |      |           |
|------------------------|-----------------------|------|-------------|----------------|------|-----------|
|                        | 1                     | 2    | Keskiarvo   | 1              | 2    | Keskiarvo |
| <b>Jätkäsaari:</b>     |                       |      |             |                |      |           |
| Koekappale 1           | 1373                  | 1055 | <b>1214</b> | 23,2           | 23,2 | 23,2      |
| Koekappale 2           | 1796                  | 1482 | <b>1639</b> | 21,1           | 21,9 | 21,5      |
| Koekappale 3           | 2486                  | 2123 | <b>2305</b> | 22,2           | 22,3 | 22,2      |
| Koekappale 4           | 999                   | 857  | <b>928</b>  | 22,4           | 22,8 | 22,6      |
| Koekappale 5           | 1341                  | 1123 | <b>1232</b> | 22,5           | 22,6 | 22,5      |
| Koekappale 6           | 1091                  | 911  | <b>1001</b> | 23,0           | 23,3 | 23,1      |
| <b>Sompasaari:</b>     |                       |      |             |                |      |           |
| Koekappale 1           | -                     | -    | -           | -              | -    | -         |
| Koekappale 2           | -                     | -    | -           | -              | -    | -         |
| Koekappale 3           | -                     | -    | -           | -              | -    | -         |
| Koekappale 4           | 728                   | 610  | <b>669</b>  | 22,5           | 22,9 | 22,7      |
| Koekappale 5           | 950                   | 643  | <b>797</b>  | 22,9           | 23,0 | 22,9      |
| Koekappale 6           | 2263                  | 2087 | <b>2175</b> | 22,9           | 23,0 | 23,0      |
| Koekappale 7           | 1508                  | 1274 | <b>1391</b> | 21,9           | 22,3 | 22,1      |
| <b>Tikkurila:</b>      |                       |      |             |                |      |           |
| Koekappale 1           | 2148                  | 1924 | <b>2036</b> | 22,7           | 22,9 | 22,8      |
| Koekappale 2           | 3400                  | 3176 | <b>3288</b> | 22,5           | 22,7 | 22,6      |
| Koekappale 3           | 1943                  | 1589 | <b>1766</b> | 22,8           | 23,0 | 22,9      |
| Koekappale 4           | 1749                  | 1379 | <b>1564</b> | 23,1           | 23,2 | 23,1      |
| Koekappale 5           | 1073                  | 898  | <b>986</b>  | 21,8           | 22,6 | 22,2      |
| Koekappale 6           | 2150                  | 2168 | <b>2159</b> | 22,8           | 23,0 | 22,9      |
| Koekappale 7           | -                     | -    | -           | -              | -    | -         |
| Koekappale 8           | 1051                  | 940  | <b>996</b>  | 23,2           | 23,3 | 23,2      |
| Koekappale 9           | 5466                  | 5001 | <b>5234</b> | 23,1           | 23,2 | 23,1      |
| Koekappale 10          | 3133                  | 2708 | <b>2921</b> | 22,3           | 22,3 | 22,3      |
| Koekappale 11          | 2660                  | 2181 | <b>2421</b> | 22,3           | 22,6 | 22,4      |
| Koekappale 12          | 1158                  | 915  | <b>1037</b> | 22,6           | 22,8 | 22,7      |



Liite I.7 Suhteelliset pysyvät muodonmuutokset

| Koekohde ja koekappale | Suhteellinen pysyvä muodonmuutos [%] | Deformaatioluokka (PANK, 2007) |
|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| <b>Jätkäsaari:</b>     |                                      |                                |
| Koekappale 1           | 2,90                                 | II                             |
| Koekappale 2           | 2,10                                 | II                             |
| Koekappale 3           | 1,40                                 | I                              |
| Koekappale 4           | -                                    | -                              |
| Koekappale 5           | -                                    | -                              |
| Koekappale 6           | -                                    | -                              |
| <b>Sompasaari:</b>     |                                      |                                |
| Koekappale 1           | 2,00                                 | I                              |
| Koekappale 2           | 1,00                                 | I                              |
| Koekappale 3           | 1,05                                 | I                              |
| Koekappale 4           | 1,75                                 | I                              |
| Koekappale 5           | 2,60                                 | II                             |
| Koekappale 6           | 0,44                                 | I                              |
| Koekappale 7           | 1,45                                 | I                              |
| <b>Tikkurila:</b>      |                                      |                                |
| Koekappale 1           | 1,20                                 | I                              |
| Koekappale 2           | 0,75                                 | I                              |
| Koekappale 3           | 1,35                                 | I                              |
| Koekappale 4           | 1,50                                 | I                              |
| Koekappale 5           | 1,80                                 | I                              |
| Koekappale 6           | 0,85                                 | I                              |
| Koekappale 7           | -                                    | -                              |
| Koekappale 8           | -                                    | -                              |
| Koekappale 9           | 0,38                                 | I                              |
| Koekappale 10          | 0,62                                 | I                              |
| Koekappale 11          | 1,45                                 | I                              |
| Koekappale 12          | 3,50                                 | II                             |

Liite J. Witczakin parannetulla ennustemallilla lasketut dynaamiset moduulit (NCHRP, 1999).

$$\log |E^*| = -1,249937 + 0,029232 \times p_{200} - 0,001767 \times p_{200}^2 - 0,002841 \times p_4 - 0,058097 \times V_a - \frac{0,802208 \times V_{\text{beff}}}{V_{\text{beff}} + V_a} + \frac{3,871977 - 0,0021 \times p_4 + 0,003958 \times p_{3/8} - 0,000017 \times p_{3/8}^2 + 0,00547 \times p_{3/4}}{1 + e^{(-0,603313 - 0,313351 \times \log(f) - 0,393532 \times \log(\eta))}}$$

Viskositeetin määrittämisessä käytetyt parametrit (Suhonen, 2010):

| Bitumiluokka | VTS    | A      |
|--------------|--------|--------|
| B 35 / 50    | -3,533 | 10,584 |
| B 50 / 70    | -3,434 | 10,283 |
| B 70 / 100   | -3,547 | 10,571 |
| B 100 / 150  | -3,600 | 10,703 |

| Lähtöarvot:  | Testilämpötila 11 - 14 °C |                      |                     |                     |                     | Testilämpötila 21 - 23 °C |                      |                     |                     |                     |
|--|---------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Koekohde   | Jätkäsaari kappale 1      | Sompasaari kappale 4 | Tikkurila kappale 2 | Tikkurila kappale 4 | Tikkurila kappale 5 | Jätkäsaari kappale 1      | Sompasaari kappale 4 | Tikkurila kappale 2 | Tikkurila kappale 4 | Tikkurila kappale 5 |
| Bitumiluokka   | 50/70                     | 70/100               | 35/50               | 70/100              | 100/150             | 50/70                     | 70/100               | 35/50               | 70/100              | 100/150             |
| VTS  | -3,434                    | -3,547               | -3,533              | -3,547              | -3,600              | -3,434                    | -3,547               | -3,533              | -3,547              | -3,600              |
| A  | 10,283                    | 10,571               | 10,584              | 10,571              | 10,703              | 10,283                    | 10,571               | 10,584              | 10,571              | 10,703              |
| t (°C)   | 13,7                      | 12,1                 | 12,9                | 13,8                | 13,8                | 23,2                      | 22,7                 | 22,6                | 23,1                | 22,2                |
| T (Rankine)  | 516,3                     | 513,5                | 514,9               | 516,5               | 516,5               | 533,4                     | 532,5                | 532,4               | 533,3               | 531,6               |
| A + VTS * log T <sub>R</sub> = log log η               | 0,966894                  | 0,956713             | 1,003483            | 0,94774             | 0,935947            | 0,9183                    | 0,900744             | 0,952201            | 0,898432            | 0,890894            |
| log η  | 9,266039                  | 9,051343             | 10,08052            | 8,866241            | 8,628729            | 8,285142                  | 7,956908             | 8,957792            | 7,914651            | 7,778469            |
| Viskositeetti, η (10 <sup>6</sup> P)                   | 18,45179                  | 11,25494             | 120,371             | 7,349223            | 4,253329            | 1,928155                  | 0,905541             | 9,073861            | 0,821583            | 0,600439            |
| Kuormitustaajuus f, laboratorio (Hz)                   | 0,5                       | 0,5                  | 0,5                 | 0,5                 | 0,5                 | 0,5                       | 0,5                  | 0,5                 | 0,5                 | 0,5                 |
| Kuormitustaajuus f, KUAB (Hz)                          | 45                        | 45                   | 45                  | 45                  | 45                  | 45                        | 45                   | 45                  | 45                  | 45                  |
| V <sub>a</sub> , Tyhjätila:                            | 0,28 %                    | 0,49 %               | 3,10 %              | 1,59 %              | 1,42 %              | 0,28 %                    | 0,49 %               | 3,10 %              | 1,59 %              | 1,42 %              |
| V <sub>b,eff</sub> , Sideainepitoisuus (Tilavuus-%)    | 7,64 %                    | 8,61 %               | 7,41 %              | 8,57 %              | 8,06 %              | 7,64 %                    | 8,61 %               | 7,41 %              | 8,57 %              | 8,06 %              |
| p <sub>3/4</sub> , 19 mm seulalle jäänyt kiviaines     | 0,00 %                    | 40,00 %              | 5,00 %              | 3,00 %              | 8,00 %              | 0,00 %                    | 40,00 %              | 5,00 %              | 3,00 %              | 8,00 %              |
| p <sub>3/8</sub> , 9,5 mm seulalle jäänyt kiviaines    | 25,00 %                   | 22,00 %              | 35,00 %             | 37,00 %             | 35,00 %             | 25,00 %                   | 22,00 %              | 35,00 %             | 37,00 %             | 35,00 %             |
| p <sub>4</sub> , 4,76 mm seulalle jäänyt kiviaines     | 48,00 %                   | 46,00 %              | 55,00 %             | 56,00 %             | 53,00 %             | 48,00 %                   | 46,00 %              | 55,00 %             | 56,00 %             | 53,00 %             |
| p <sub>200</sub> , 0,075 mm seulan läpäissyt kiviaines | 10,00 %                   | 10,00 %              | 6,00 %              | 8,00 %              | 9,00 %              | 10,00 %                   | 10,00 %              | 6,00 %              | 8,00 %              | 9,00 %              |

| Laskenta (laboratoriokuormitus):    | Testilämpötila 11 - 14 °C |           |           |           |           | Testilämpötila 21 - 23 °C |           |           |           |           |
|-------------------------------------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Laskentakaavan yläosa               | -2,022405                 | -2,007635 | -1,817144 | -1,92679  | -1,931697 | -2,022405                 | -2,007635 | -1,817144 | -1,92679  | -1,931697 |
| Laskentakaavan loppuosa (jaettava)  | 3,871957                  | 3,874069  | 3,872479  | 3,872427  | 3,872685  | 3,871957                  | 3,874069  | 3,872479  | 3,872427  | 3,872685  |
| Jakajan eksponentti                 | -1,007212                 | -0,922722 | -1,327737 | -0,849879 | -0,75641  | -0,621197                 | -0,492027 | -0,885907 | -0,475398 | -0,421805 |
| Laskentakaavan loppuosa (jakaja)    | 1,365236                  | 1,397436  | 1,265076  | 1,427467  | 1,469348  | 1,537301                  | 1,611386  | 1,41234   | 1,621638  | 1,655862  |
| Loppuosan osamäärä                  | 2,836109                  | 2,77227   | 3,061063  | 2,712797  | 2,635648  | 2,518673                  | 2,404184  | 2,741888  | 2,387973  | 2,338773  |
| Yläosan ja alaosan summa (log  E* ) | 0,813704                  | 0,764635  | 1,243919  | 0,786007  | 0,703951  | 0,496268                  | 0,396549  | 0,924744  | 0,461183  | 0,407076  |

| Tulokset laboratoriokuormitukselle:   | Testilämpötila 11 - 14 °C |              |              |                       |             | Testilämpötila 21 - 23 °C |             |              |                       |             |
|---|---------------------------|--------------|--------------|-----------------------|-------------|---------------------------|-------------|--------------|-----------------------|-------------|
| Dynaaminen moduuli  E*  (10 <sup>5</sup> psi)                               | 6,511839                  | 5,816138     | 17,53553     | 6,109514              | 5,057671    | 3,135219                  | 2,492007    | 8,408999     | 2,891897              | 2,553147    |
| Dynaaminen moduuli  E*  (MPa)   | <b>4491</b>               | <b>4011</b>  | <b>12093</b> | <b>4213</b>           | <b>3488</b> | <b>2162</b>               | <b>1719</b> | <b>5799</b>  | <b>1994</b>           | <b>1761</b> |
|   |                           |              |              | 5554                  | 5494        |                           |             |              | 2708                  | 2880        |
|   |                           |              |              | Bitumiluokalle B50/70 |             |                           |             |              | Bitumiluokalle B50/70 |             |
| Jäykkyysmoduuli E <sub>laboratorio</sub> (MPa)                              | 4100                      | 3471         | 7907         | 5167                  | 5452        | 1214                      | 669         | 3288         | 1564                  | 986         |
| ( E*  - E <sub>laboratorio</sub> ) / E <sub>laboratorio</sub> * 100 (%)     | 10                        | 16           | 53           | -18                   | -36         | 78                        | 157         | 76           | 28                    | 79          |
|   |                           |              |              | 7                     | 1           |                           |             |              | 73                    | 192         |
|   |                           |              |              | Bitumiluokalle B50/70 |             |                           |             |              | Bitumiluokalle B50/70 |             |
| <b>Tulokset kenttäkuormitukselle:</b>                                       |                           |              |              |                       |             |                           |             |              |                       |             |
| Dynaaminen moduuli  E*  <sub>KUAB 45 Hz</sub> (MPa)                         | <b>11195</b>              | <b>10444</b> | <b>25783</b> | <b>11433</b>          | <b>9905</b> | <b>6529</b>               | <b>5505</b> | <b>15365</b> | <b>6431</b>           | <b>5806</b> |
| Jäykkyysmoduuli, suoralaskenta (MPa)  |                           |              |              |                       |             | 5368                      | 5692        | 5800         | 6264                  | 9300        |
| ( E*  - E <sub>suoralaskenta</sub> ) / E <sub>suoralaskenta</sub> * 100 (%) |                           |              |              |                       |             | 22                        | -3          | 165          | 3                     | -38         |

Liite K.1 Heavy Loadman -pudotuspainomittaukset - Jätkäsaari

| Jätkäsaari |                    |                    |                    |       |                    |                    |                    |
|------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Piste      | Mittaus 1<br>[MPa] | Mittaus 2<br>[MPa] | Mittaus 3<br>[MPa] | Piste | Mittaus 1<br>[MPa] | Mittaus 2<br>[MPa] | Mittaus 3<br>[MPa] |
| 1          | 64                 | 274                | 412                | 19    | 327                | 165                | 187                |
| 2          | 264                | 235                | 377                | 20    | 5319               | 10000              | 10000              |
| 3          | 201                | 137                | 297                | 20    | 144                | 328                | 370                |
| 4          | 191                | 2633               | 340                | 21    | 511                | 209                | 589                |
| 4          | 319                | 337                | 214                | 22    | 424                | 337                | 246                |
| 5          | 116                | 210                | 220                | 23    | 417                | 9064               | 1059               |
| 6          | 1560               | 448                | 928                | 23    | 450                | 332                | 561                |
| 6          | 218                | 538                | 640                | 24    | 520                | 256                | 467                |
| 7          | 126                | 286                | 6367               | 25    | 412                | 292                | 229                |
| 7          | 346                | 158                | 1813               | 26    | 773                | 193                | 486                |
| 8          | 204                | 148                | 281                | 27    | 487                | 319                | 208                |
| 9          | 289                | 493                | 219                | 28    | 1028               | 279                | 563                |
| 10         | 601                | 1236               | 1310               | 28    | 977                | 269                | 867                |
| 11         | 208                | 225                | 671                | 29    | 200                | 268                | 252                |
| 12         | 617                | 876                | 495                | 30    | 484                | 294                | 226                |
| 13         | 250                | 214                | 328                | 31    | 564                | 388                | 330                |
| 14         | 548                | 297                | 2446               | 32    | 192                | 239                | 209                |
| 14         | 203                | 329                | 1231               | 32    | 336                | 218                | 173                |
| 15         | 513                | 400                | 2815               | 33    | 223                | 174                | 266                |
| 16         | 976                | 382                | 3538               | 34    | 248                | 277                | 113                |
| 17         | 249                | 132                | 673                | 35    | 174                | 179                | 212                |
| 18         | 2693               | 194                | 1396               | 36    | 305                | 726                | 221                |
| 18         | 282                | 414                | 736                |       |                    |                    |                    |

Liite K.2 Heavy Loadman -pudotuspainomittaukset - Sompasaari

| Sompasaari |                    |                    |                    |       |                    |                    |                    |
|------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Piste      | Mittaus 1<br>[MPa] | Mittaus 2<br>[MPa] | Mittaus 3<br>[MPa] | Piste | Mittaus 1<br>[MPa] | Mittaus 2<br>[MPa] | Mittaus 3<br>[MPa] |
| 1          | 189                | 291                | 181                | 18    | 155                | 217                | 1281               |
| 2          | 216                | 205                | 243                | 18    | 304                | 2555               | 274                |
| 3          | 137                | 286                | 276                | 19    | 175                | 329                | 259                |
| 4          | 164                | 290                | 544                | 20    | 181                | 144                | 261                |
| 4          | 869                | 570                | 246                | 21    | 96                 | 152                | 224                |
| 5          | 304                | 609                | 360                | 22    | 146                | 142                | 275                |
| 6          | 190                | 375                | 846                | 23    | 4574               | 187                | 253                |
| 7          | 253                | 338                | 2216               | 23    | 260                | 486                | 1182               |
| 7          | 350                | 662                | 129                | 24    | 136                | 491                | 3408               |
| 8          | 151                | 195                | 1380               | 24    | 842                | 115                | 208                |
| 8          | 848                | 235                | 228                | 25    | 133                | 297                | 199                |
| 9          | 162                | 158                | 3916               | 26    | 95                 | 322                | 159                |
| 9          | 535                | 228                | 1629               | 27    | 130                | 240                | 261                |
| 10         | 107                | 997                | 499                | 28    | 402                | 359                | 128                |
| 11         | 125                | 237                | 521                | 28    | 336                | 1141               | 199                |
| 12         | 119                | 206                | 583                | 29    | 258                | 293                | 641                |
| 13         | 831                | 156                | 175                | 30    | 185                | 270                | 309                |
| 13         | 279                | 464                | 522                | 31    | 284                | 4674               | 336                |
| 14         | 271                | 149                | 1893               | 31    | 1011               | 493                | 86                 |
| 14         | 2324               | 107                | 217                | 32    | 30                 | 235                | 458                |
| 14         | 370                | 299                | 555                | 33    | 297                | 299                | 694                |
| 15         | 159                | 222                | 373                | 34    | 957                | 667                | 559                |
| 15         | 265                | 598                | 364                | 34    | 658                | 4177               | 444                |
| 16         | 212                | 616                | 10000              | 35    | 137                | 212                | 156                |
| 16         | 2469               | 260                | 4274               | 36    | 198                | 181                | 125                |
| 17         | 189                | 371                | 363                |       |                    |                    |                    |

Liite K.3 Heavy Loadman -pudotuspainomittaukset - Tikkurilan linja-autoterminaali.

| Tikkurilan linja-autoterminaali |                    |                    |                    |
|---------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Piste                           | Mittaus 1<br>[MPa] | Mittaus 2<br>[MPa] | Mittaus 3<br>[MPa] |
| 1                               | 280                | 258                | 860                |
| 2                               | 11995              | 225                | 308                |
| 2                               | 205                | 454                | 1929               |
| 3                               | 170                | 251                | 215                |
| 4                               | 2421               | 277                | 115                |
| 4                               | 317                | 4001               | 284                |
| 5                               | 170                | 1409               | 301                |
| 5                               | 831                | 1589               | 288                |
| 6                               | 247                | 146                | 381                |
| 7                               | 242                | 65                 | 304                |

Liite K.4 Heavy Loadman -pudotuspainomittaukset - Vuosaari, koekohde 1

| Vuosaari, koekohde 1 |                    |                    |                    |       |                    |                    |                    |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Piste                | Mittaus 1<br>[MPa] | Mittaus 2<br>[MPa] | Mittaus 3<br>[MPa] | Piste | Mittaus 1<br>[MPa] | Mittaus 2<br>[MPa] | Mittaus 3<br>[MPa] |
| 1                    | 44                 | 533                | 1026               | 17    | 68                 | 62                 | 1615               |
| 1                    | 707                | 174                | 32                 | 18    | 5244               | 3338               | 1219               |
| 1                    | 106                | 2709               | 980                | 18    | 50                 | 54                 | 122                |
| 2                    | 295                | 310                | 506                | 18    | 105                | 137                | 58                 |
| 3                    | 101                | 3127               | 224                | 19    | 470                | 42                 | 332                |
| 3                    | 66                 | 389                | 146                | 20    | 76                 | 1079               | 98                 |
| 4                    | 1236               | 457                | 416                | 20    | 3332               | 4905               | 226                |
| 4                    | 433                | 1705               | 9169               | 21    | 4038               | 677                | 116                |
| 5                    | 220                | 261                | 7090               | 22    | 2841               | 118                | 74                 |
| 5                    | 1801               | 132                | 795                | 23    | 1559               | 783                | 93                 |
| 6                    | 360                | 482                | 423                | 23    | 103                | 64                 | 2022               |
| 7                    | 867                | 4280               | 96                 | 24    | 65                 | 642                | 81                 |
| 7                    | 57                 | 154                | 167                | 26    | 277                | 162                | 323                |
| 8                    | 246                | 620                | 648                | 27    | 112                | 95                 | 220                |
| 9                    | 71                 | 7488               | 430                | 28    | 114                | 753                | 331                |
| 9                    | 231                | 936                | 210                | 28    | 149                | 176                | 59                 |
| 10                   | 1070               | 371                | 424                | 29    | 83                 | 81                 | 224                |
| 11                   | 70                 | 332                | 776                | 30    | 2254               | 234                | 1100               |
| 12                   | 1317               | 550                | 10000              | 30    | 296                | 96                 | 75                 |
| 12                   | 485                | 156                | 269                | 31    | 85                 | 109                | 279                |
| 13                   | 477                | 728                | 66                 | 32    | 1763               | 2575               | 727                |
| 13                   | 869                | 246                | 98                 | 32    | 110                | 458                | 1631               |
| 14                   | 51                 | 223                | 247                | 33    | 375                | 482                | 72                 |
| 15                   | 246                | 50                 | 1350               | 34    | 167                | 484                | 55                 |
| 16                   | 331                | 318                | 150                | 35    | 642                | 288                | 891                |
| 17                   | 5534               | 78                 | 63                 |       |                    |                    |                    |

Liite K.5 Heavy Loadman -pudotuspainomittaukset - Vuosaari, koekohde 2

| Vuosaari, koekohde 2 |                    |                    |                    |       |                    |                    |                    |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Piste                | Mittaus 1<br>[MPa] | Mittaus 2<br>[MPa] | Mittaus 3<br>[MPa] | Piste | Mittaus 1<br>[MPa] | Mittaus 2<br>[MPa] | Mittaus 3<br>[MPa] |
| 1                    | 5629               | 336                | 173                | 9     | 166                | 249                | 227                |
| 1                    | 834                | 154                | 182                | 12    | 120                | 331                | 1590               |
| 2                    | 74                 | 391                | 35                 | 12    | 1061               | 143                | 249                |
| 2                    | 91                 | 1087               | 57                 | 13    | 622                | 158                | 122                |
| 3                    | 2305               | 1632               | 46                 | 14    | 136                | 349                | 104                |
| 3                    | 176                | 299                | 972                | 15    | 184                | 269                | 313                |
| 4                    | 315                | 245                | 1499               | 16    | 322                | 320                | 1126               |
| 5                    | 203                | 1481               | 370                | 16    | 240                | 362                | 124                |
| 5                    | 731                | 853                | 1435               | 17    | 261                | 305                | 266                |
| 6                    | 152                | 210                | 213                | 18    | 276                | 279                | 438                |
| 7                    | 264                | 181                | 268                | 20    | 326                | 204                | 217                |
| 8                    | 135                | 258                | 322                |       |                    |                    |                    |

Liite K.6 Heavy Loadman -pudotuspainomittaukset - Maaliikennekeskus

| Maaliikennekeskus |                    |                    |                    |       |                    |                    |                    |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Piste             | Mittaus 1<br>[MPa] | Mittaus 2<br>[MPa] | Mittaus 3<br>[MPa] | Piste | Mittaus 1<br>[MPa] | Mittaus 2<br>[MPa] | Mittaus 3<br>[MPa] |
| 1                 | 194                | 202                | 205                | 23    | 165                | 355                | 470                |
| 2                 | 517                | 637                | 261                | 24    | 4696               | 779                | 10000              |
| 5                 | 243                | 265                | 357                | 24    | 530                | 388                | 1925               |
| 6                 | 215                | 539                | 328                | 25    | 162                | 41                 | 174                |
| 7                 | 326                | 324                | 278                | 26    | 1027               | 1436               | 4339               |
| 8                 | 258                | 200                | 396                | 26    | 415                | 582                | 6340               |
| 11                | 590                | 255                | 287                | 27    | 430                | 512                | 1068               |
| 12                | 62                 | 605                | 211                | 27    | 3107               | 1602               | 253                |
| 13                | 189                | 172                | 1973               | 28    | 1614               | 175                | 740                |
| 13                | 502                | 194                | 412                | 28    | 189                | 602                | 503                |
| 14                | 631                | 1511               | 348                | 29    | 2243               | 152                | 146                |
| 14                | 905                | 459                | 814                | 30    | 1795               | 540                | 266                |
| 17                | 260                | 397                | 373                | 30    | 393                | 192                | 126                |
| 18                | 1827               | 244                | 302                | 31    | 5226               | 578                | 484                |
| 19                | 779                | 4914               | 298                | 31    | 606                | 294                | 447                |
| 19                | 491                | 693                | 574                | 32    | 213                | 304                | 171                |
| 20                | 195                | 10000              | 1124               | 33    | 361                | 113                | 406                |
| 20                | 366                | 998                | 10200              | 34    | 2719               | 464                | 47                 |
| 21                | 2772               | 225                | 242                | 34    | 478                | 2938               | 10000              |
| 21                | 449                | 332                | 1092               | 35    | 409                | 220                | 694                |
| 22                | 424                | 565                | 5036               | 36    | 36                 | 114                | 2299               |
| 22                | 1250               | 10000              | 3037               | 36    | 442                | 1605               | 394                |

Liite K.7 Heavy Loadman -pudotuspainomittaukset - Nihtisillan linja-autovarikko

| Nihtisillan linja-autovarikko |                    |                    |                    |       |                    |                    |                    |
|-------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Piste                         | Mittaus 1<br>[MPa] | Mittaus 2<br>[MPa] | Mittaus 3<br>[MPa] | Piste | Mittaus 1<br>[MPa] | Mittaus 2<br>[MPa] | Mittaus 3<br>[MPa] |
| 3                             | 260                | 223                | 130                | 20    | 189                | 286                | 1071               |
| 4                             | 209                | 196                | 356                | 20    | 454                | 305                | 615                |
| 5                             | 461                | 855                | 147                | 21    | 149                | 1012               | 265                |
| 5                             | 918                | 413                | 849                | 21    | 592                | 399                | 315                |
| 6                             | 1443               | 689                | 1125               | 22    | 79                 | 95                 | 70                 |
| 6                             | 1639               | 2241               | 291                | 23    | 101                | 116                | 222                |
| 7                             | 294                | 388                | 315                | 24    | 159                | 107                | 145                |
| 8                             | 104                | 633                | 315                | 25    | 137                | 475                | 425                |
| 9                             | 214                | 837                | 183                | 26    | 155                | 153                | 121                |
| 10                            | 196                | 208                | 210                | 27    | 200                | 240                | 147                |
| 11                            | 202                | 494                | 194                | 28    | 785                | 505                | 220                |
| 13                            | 135                | 153                | 412                | 29    | 264                | 649                | 261                |
| 14                            | 138                | 137                | 329                | 30    | 407                | 355                | 11774              |
| 15                            | 105                | 165                | 123                | 30    | 285                | 150                | 101                |
| 16                            | 138                | 151                | 177                | 31    | 532                | 565                | 252                |
| 17                            | 291                | 202                | 101                | 32    | 407                | 271                | 308                |
| 18                            | 1101               | 466                | 185                | 33    | 135                | 209                | 156                |
| 18                            | 173                | 197                | 280                | 34    | 126                | 192                | 143                |
| 19                            | 285                | 203                | 2591               | 35    | 344                | 172                | 385                |
| 19                            | 197                | 630                | 193                | 36    | 479                | 414                | 248                |

Liite K.8 Heavy Loadman -pudotuspainomittaukset - Suomenojan linja-autovarikko

| Suomenojan linja-autovarikko |                    |                    |                    |       |                    |                    |                    |
|------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Piste                        | Mittaus 1<br>[MPa] | Mittaus 2<br>[MPa] | Mittaus 3<br>[MPa] | Piste | Mittaus 1<br>[MPa] | Mittaus 2<br>[MPa] | Mittaus 3<br>[MPa] |
| 1                            | 146                | 424                | 710                | 9     | 514                | 199                | 669                |
| 2                            | 134                | 712                | 320                | 10    | 166                | 209                | 1876               |
| 3                            | 140                | 376                | 6951               | 10    | 480                | 476                | 524                |
| 3                            | 326                | 309                | 111                | 11    | 142                | 154                | 95                 |
| 4                            | 114                | 346                | 465                | 12    | 176                | 163                | 223                |
| 5                            | 98                 | 325                | 265                | 13    | 133                | 272                | 163                |
| 6                            | 135                | 294                | 150                | 14    | 155                | 222                | 135                |
| 7                            | 145                | 325                | 241                | 15    | 155                | 182                | 224                |
| 8                            | 225                | 665                | 397                | 16    | 121                | 131                | 120                |

Liite L.1 KUAB -pudotuspainomittaukset - Jätkäsaari

Pudotuspainomittaukset: Jätkäsaari

Kokonaiskantavuus (E2) / Alusrakenteen kantavuus (E2) [MPa]

| Linja 1                       | Linja 2                      | Linja 3                      | Linja 4                      | Linja 5                      | Linja 6                      |
|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Paalu 26<br><b>771 / 262</b>  | Paalu 26<br><b>825 / 203</b> | Paalu 26<br><b>730 / 216</b> | Paalu 26<br><b>649 / 195</b> | Paalu 26<br><b>482 / 216</b> | Paalu 26<br><b>449 / 221</b> |
| Paalu 31<br><b>1029 / 293</b> | Paalu 31<br><b>665 / 226</b> | Paalu 31<br><b>765 / 249</b> | Paalu 31<br><b>647 / 255</b> | Paalu 30<br><b>649 / 284</b> | Paalu 31<br><b>539 / 269</b> |
| Paalu 36<br><b>1055 / 269</b> | Paalu 36<br><b>868 / 207</b> | Paalu 36<br><b>868 / 321</b> | Paalu 36<br><b>662 / 262</b> | Paalu 36<br><b>743 / 293</b> | Paalu 36<br><b>575 / 221</b> |
| Paalu 41<br><b>807 / 321</b>  | Paalu 42<br><b>655 / 311</b> | Paalu 41<br><b>649 / 321</b> | Paalu 41<br><b>511 / 203</b> | Paalu 41<br><b>644 / 343</b> | Paalu 41<br><b>604 / 249</b> |
| Paalu 46<br><b>638 / 203</b>  | Paalu 46<br><b>711 / 184</b> | Paalu 46<br><b>573 / 172</b> | Paalu 46<br><b>514 / 249</b> | Paalu 46<br><b>565 / 524</b> | Paalu 47<br><b>527 / 433</b> |
| Paalu 51<br><b>618 / 124</b>  | Paalu 51<br><b>461 / 123</b> | Paalu 51<br><b>604 / 138</b> | Paalu 51<br><b>563 / 188</b> | Paalu 50<br><b>527 / 369</b> | Paalu 51<br><b>554 / 398</b> |
| Linja 1                       | Linja 2                      | Linja 3                      | Linja 4                      | Linja 5                      | Linja 6                      |



Liite L.2 KUAB -pudotuspainomittaukset - Sompasaari

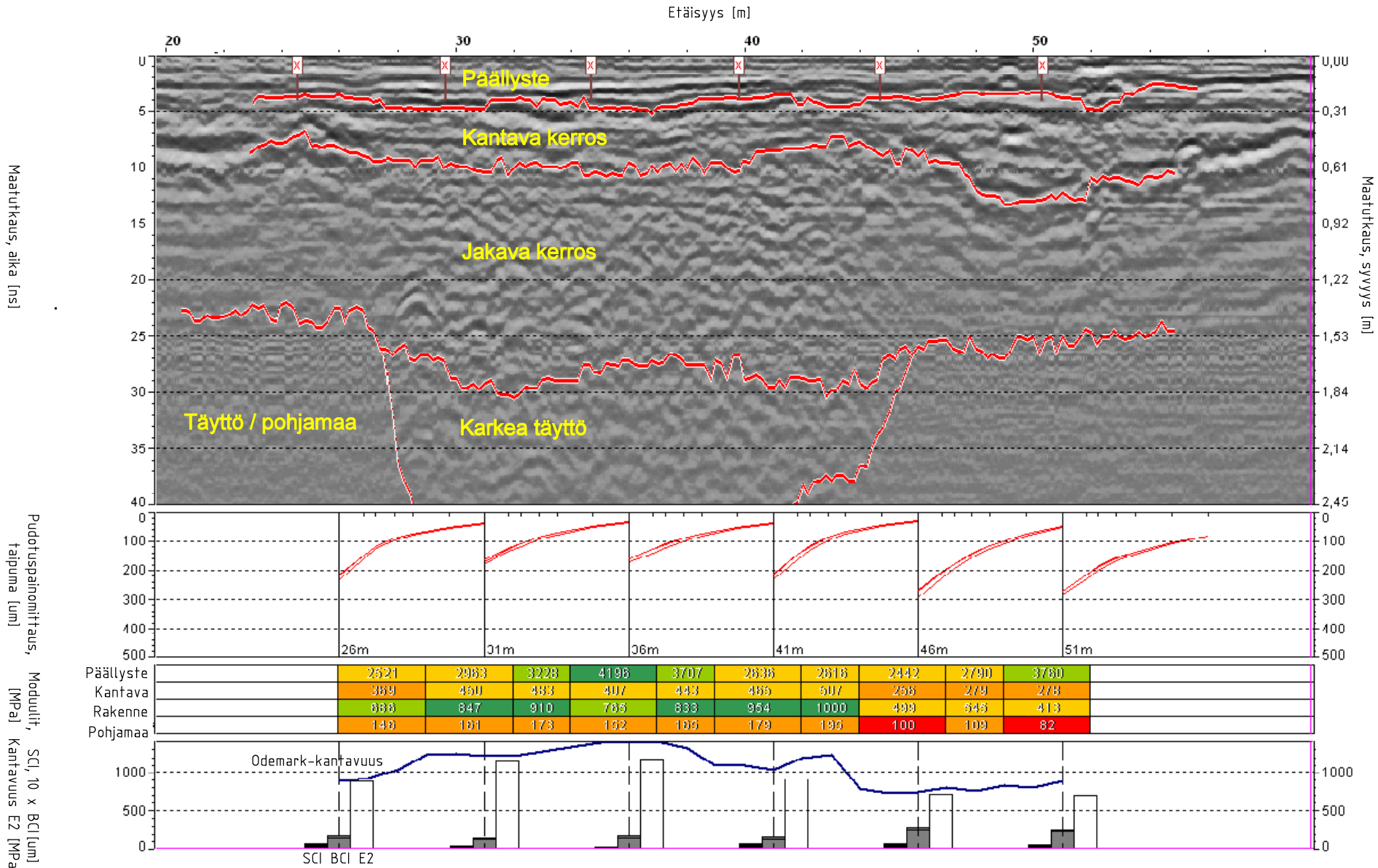
Pudotuspainomittaukset: Sompasaari

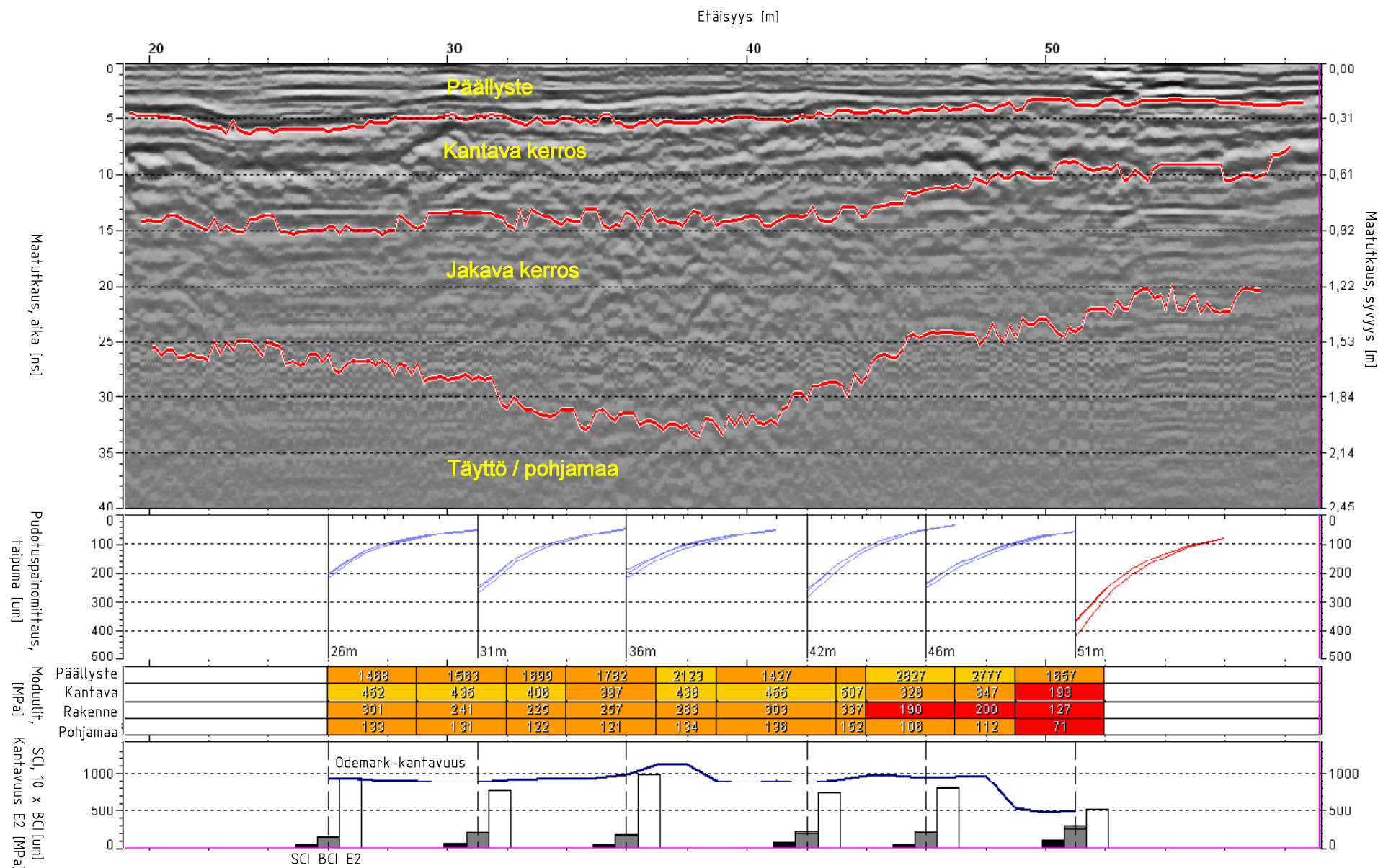
Kokonaiskantavuus (E2) / Alusrakenteen kantavuus (E2) [MPa]

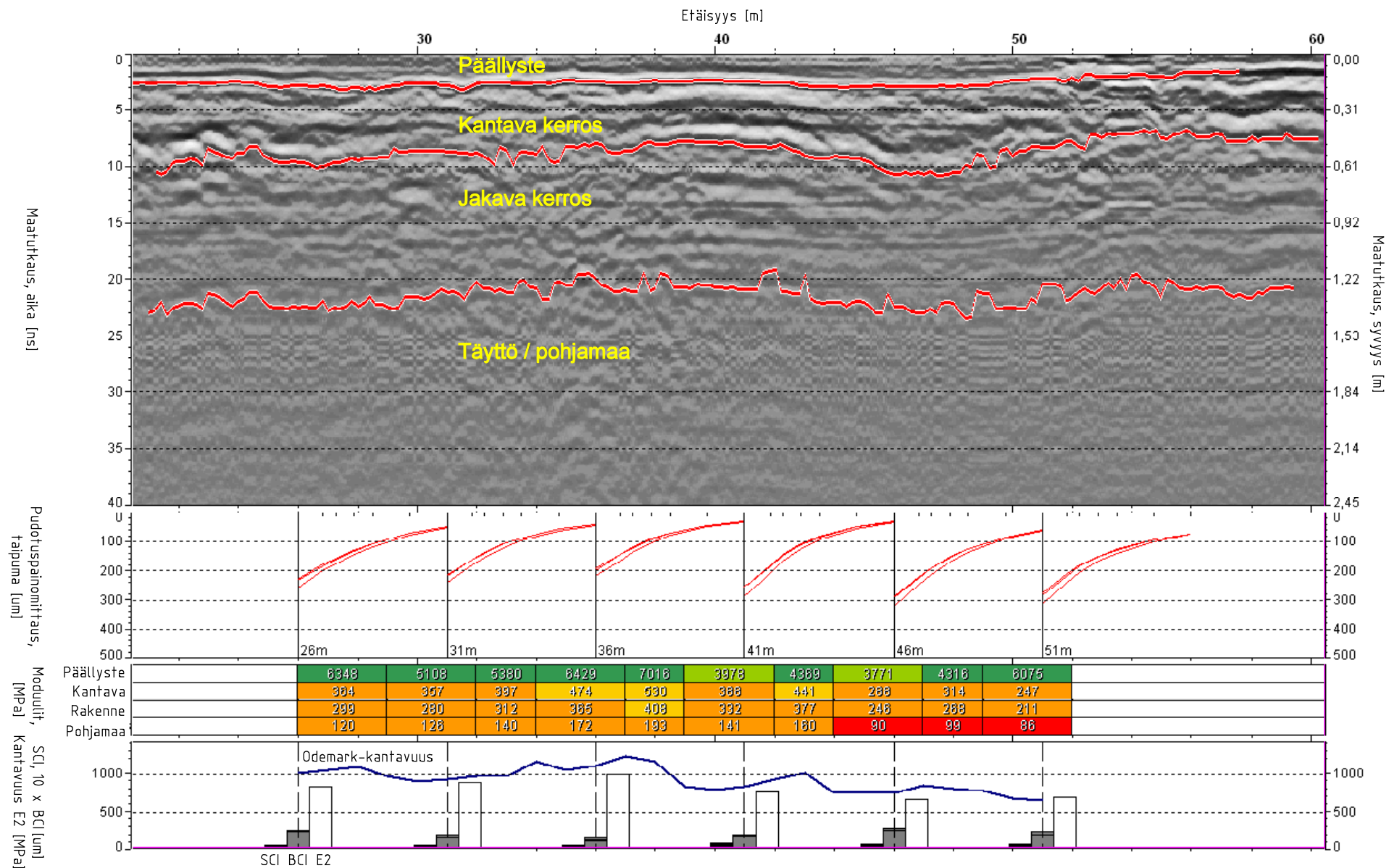
| Linja 1                       | Linja 2                       | Linja 3                       | Linja 4                       | Linja 5                       | Linja 6                       |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Paalu 13<br><b>585 / 311</b>  | Paalu 13<br><b>543 / 321</b>  | Paalu 13<br><b>556 / 249</b>  | Paalu 13<br><b>583 / 293</b>  | Paalu 13<br><b>462 / 203</b>  | Paalu 13<br><b>437 / 203</b>  |
| Paalu 17<br><b>590 / 321</b>  | Paalu 18<br><b>521 / 321</b>  | Paalu 18<br><b>553 / 269</b>  | Paalu 18<br><b>561 / 269</b>  | Paalu 18<br><b>502 / 249</b>  | Paalu 18<br><b>495 / 284</b>  |
| Paalu 22<br><b>688 / 383</b>  | Paalu 23<br><b>550 / 321</b>  | Paalu 22<br><b>586 / 284</b>  | Paalu 23<br><b>572 / 332</b>  | Paalu 23<br><b>610 / 553</b>  | Paalu 23<br><b>608 / 3317</b> |
| Paalu 27<br><b>633 / 663</b>  | Paalu 28<br><b>575 / 663</b>  | Paalu 27<br><b>576 / 383</b>  | Paalu 28<br><b>539 / 553</b>  | Paalu 28<br><b>654 / 1106</b> | Paalu 28<br><b>684 / 2488</b> |
| Paalu 33<br><b>668 / 765</b>  | Paalu 32<br><b>721 / 1990</b> | Paalu 32<br><b>641 / 1106</b> | Paalu 33<br><b>693 / 829</b>  | Paalu 32<br><b>651 / 1421</b> | Paalu 33<br><b>642 / 1658</b> |
| Paalu 37<br><b>640 / 1658</b> | Paalu 37<br><b>648 / 995</b>  | Paalu 37<br><b>715 / 2488</b> | Paalu 38<br><b>702 / 1106</b> | Paalu 37<br><b>784 / 905</b>  | Paalu 38<br><b>650 / 1244</b> |
| Linja 1                       | Linja 2                       | Linja 3                       | Linja 4                       | Linja 5                       | Linja 6                       |

Liite L.3 KUAB -pudotuspainomittaukset - Tikkurilan linja-autoterminali

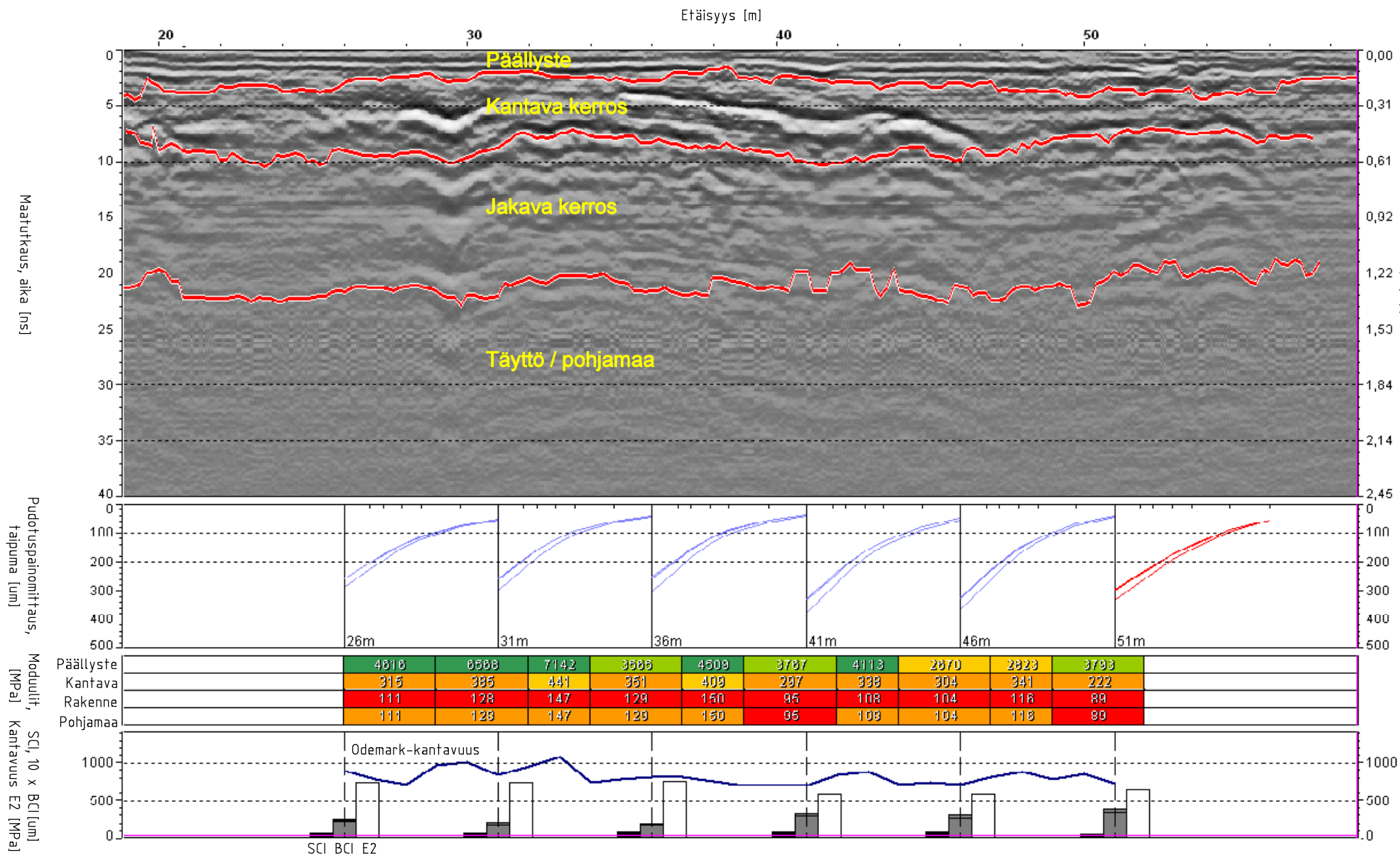
| Pudotuspainomittaukset: Tikkurilan linja-autoterminali |                                  |                                       |          |                                  |                                       |
|--|----------------------------------|---------------------------------------|----------|----------------------------------|---------------------------------------|
| Linja 1:   |                                  |                                       | Linja 2: |                                  |                                       |
| Paalu  | Kokonais-kantavuus (E2)<br>[MPa] | Alusrakenteen kantavuus (E2)<br>[MPa] | Paalu    | Kokonais-kantavuus (E2)<br>[MPa] | Alusrakenteen kantavuus (E2)<br>[MPa] |
| 51   | 503                              | 158                                   | 111      | 440                              | 129                                   |
| 56   | 518                              | 163                                   | 116      | 463                              | 138                                   |
| 61   | 505                              | 155                                   | 121      | 459                              | 149                                   |
| 66   | 460                              | 146                                   | 126      | 457                              | 151                                   |
| 71   | 581                              | 249                                   | 131      | 497                              | 178                                   |
| 76   | 579                              | 195                                   | 136      | 483                              | 184                                   |
| 81   | 718                              | 175                                   | 141      | 519                              | 181                                   |
| 96   | 603                              | 188                                   | 146      | 457                              | 163                                   |
| 101  | 498                              | 160                                   | 151      | 463                              | 166                                   |
| 106  | 483                              | 163                                   | 156      | 478                              | 160                                   |
| 111  | 467                              | 172                                   | 161      | 573                              | 207                                   |
| 116  | 581                              | 226                                   | Linja 3: |                                  |                                       |
| 121  | 453                              | 212                                   | Paalu    | Kokonais-kantavuus (E2)<br>[MPa] | Alusrakenteen kantavuus (E2)<br>[MPa] |
| 126  | 495                              | 221                                   | 124      | 352                              | 134                                   |
| 131  | 534                              | 243                                   | 129      | 435                              | 158                                   |
| 136  | 534                              | 249                                   | 134      | 552                              | 163                                   |
| 141  | 485                              | 221                                   | 139      | 548                              | 142                                   |
| 146  | 599                              | 262                                   | 144      | 445                              | 149                                   |
| 151  | 537                              | 160                                   | 149      | 471                              | 160                                   |
| 156  | 554                              | 184                                   | Linja 4: |                                  |                                       |
| 161  | 576                              | 269                                   | Paalu    | Kokonais-kantavuus (E2)<br>[MPa] | Alusrakenteen kantavuus (E2)<br>[MPa] |
| 166  | 543                              | 237                                   | 129      | 347                              | 123                                   |
|  |                                  |                                       | 134      | 289                              | 114                                   |
|  |                                  |                                       | 139      | 348                              | 153                                   |
|  |                                  |                                       | 144      | 338                              | 149                                   |

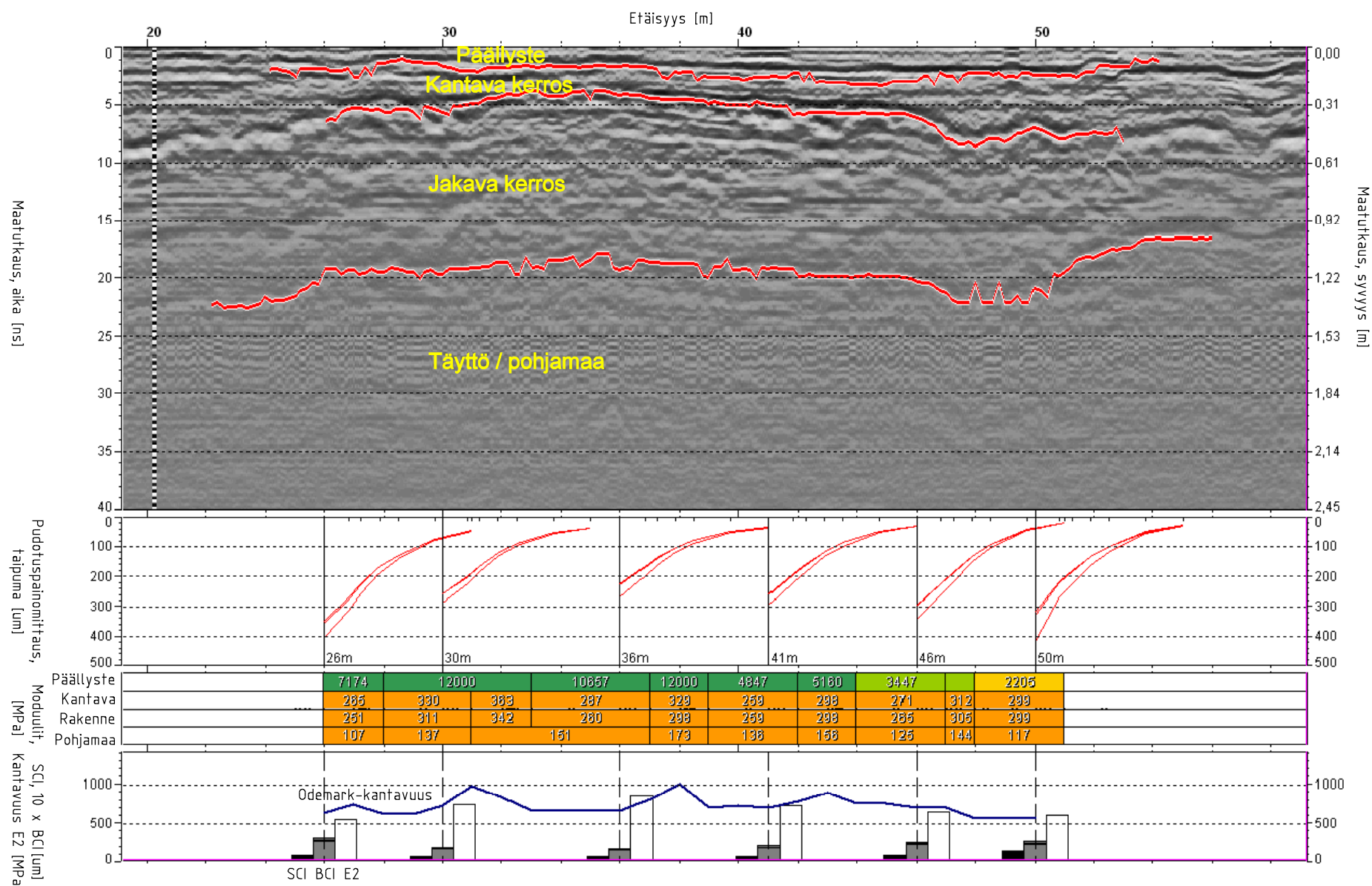






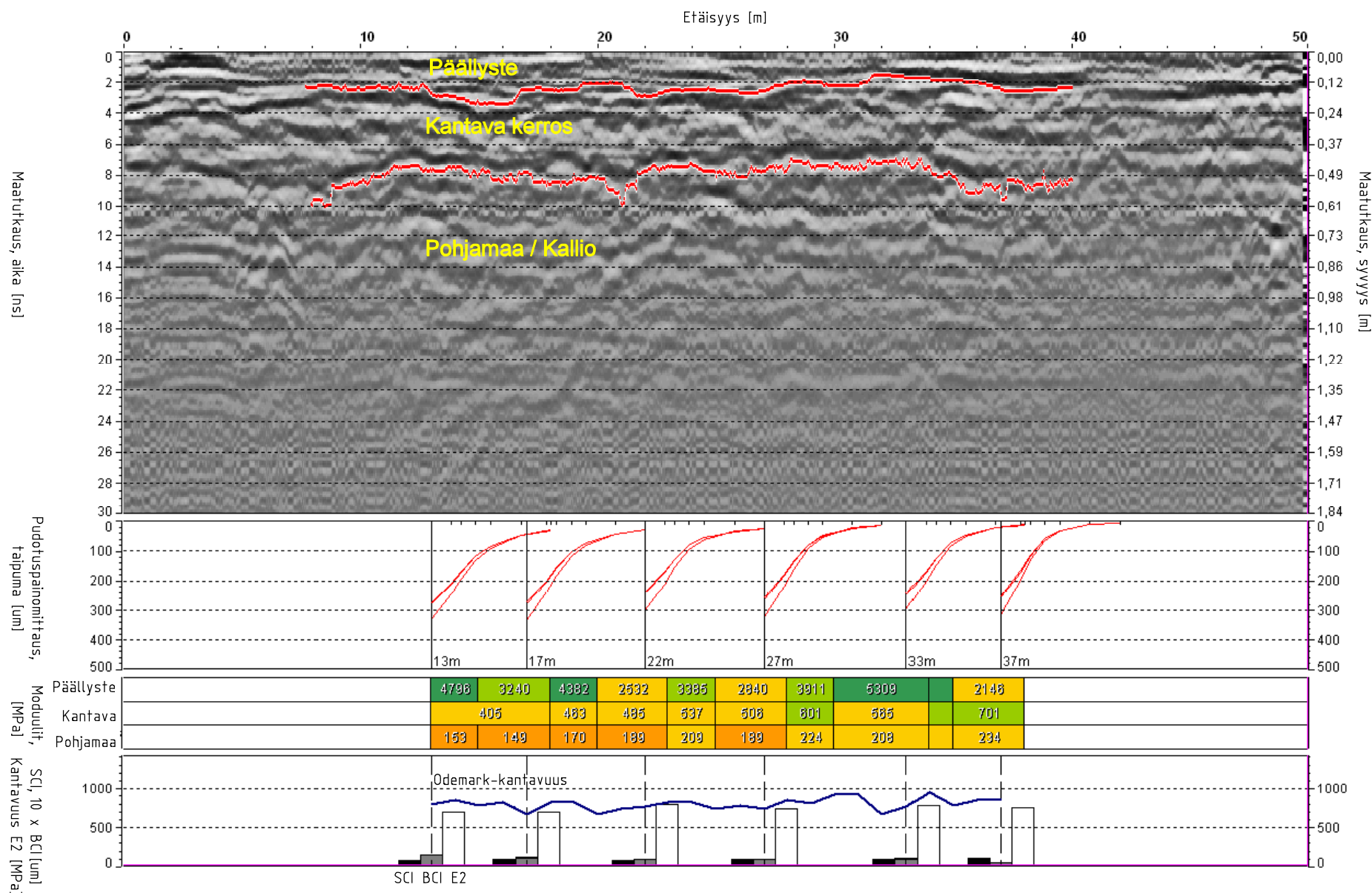


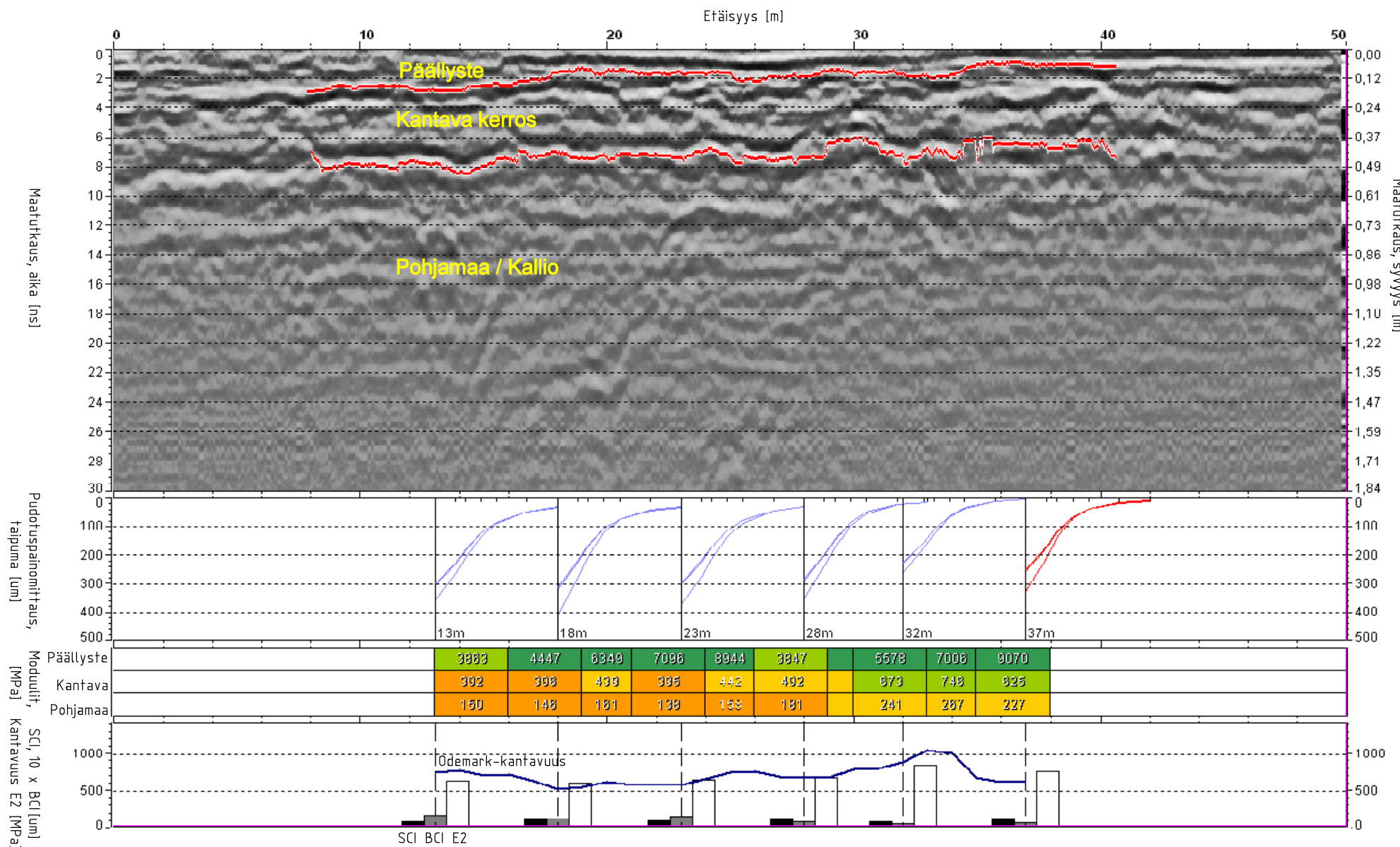




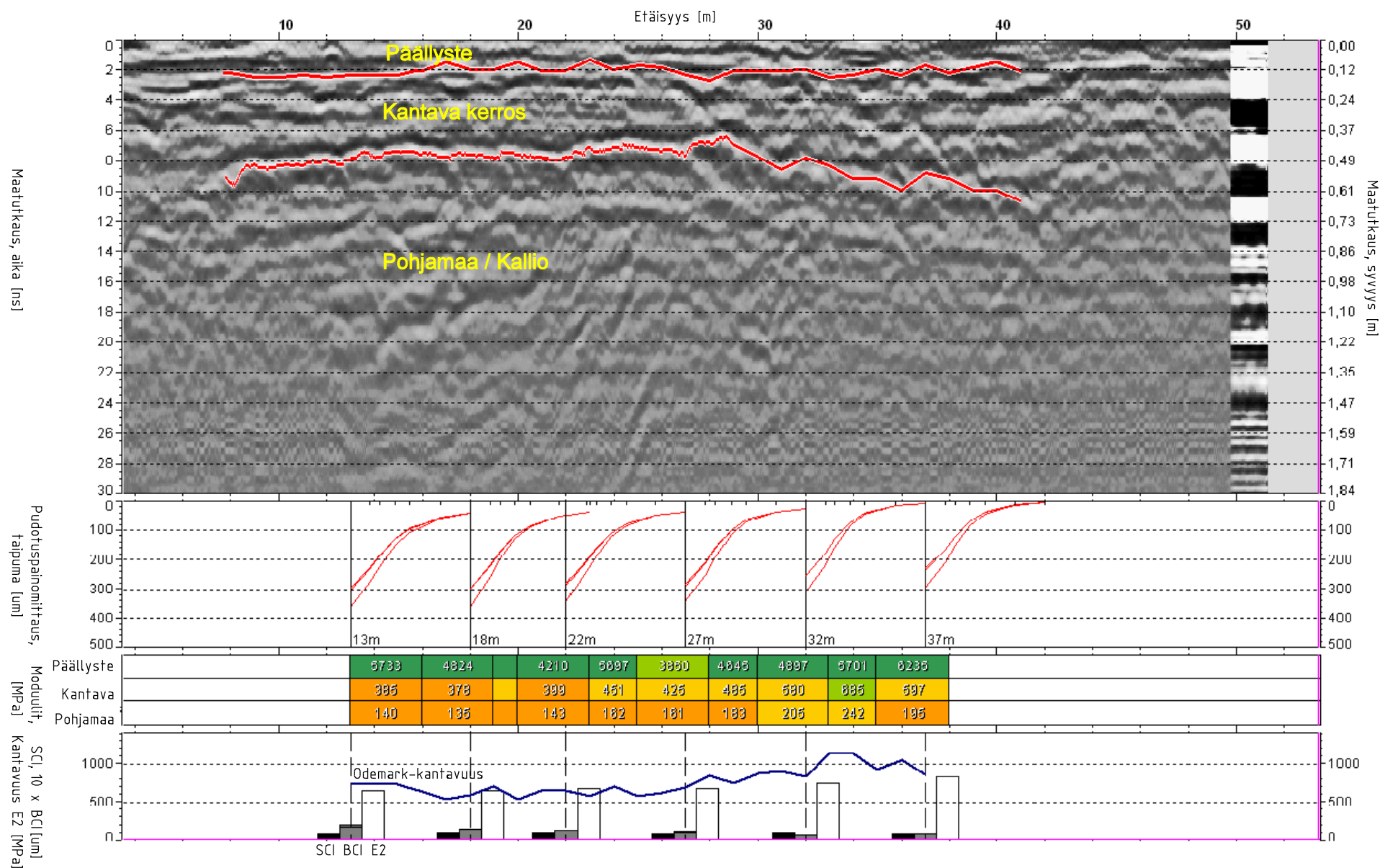


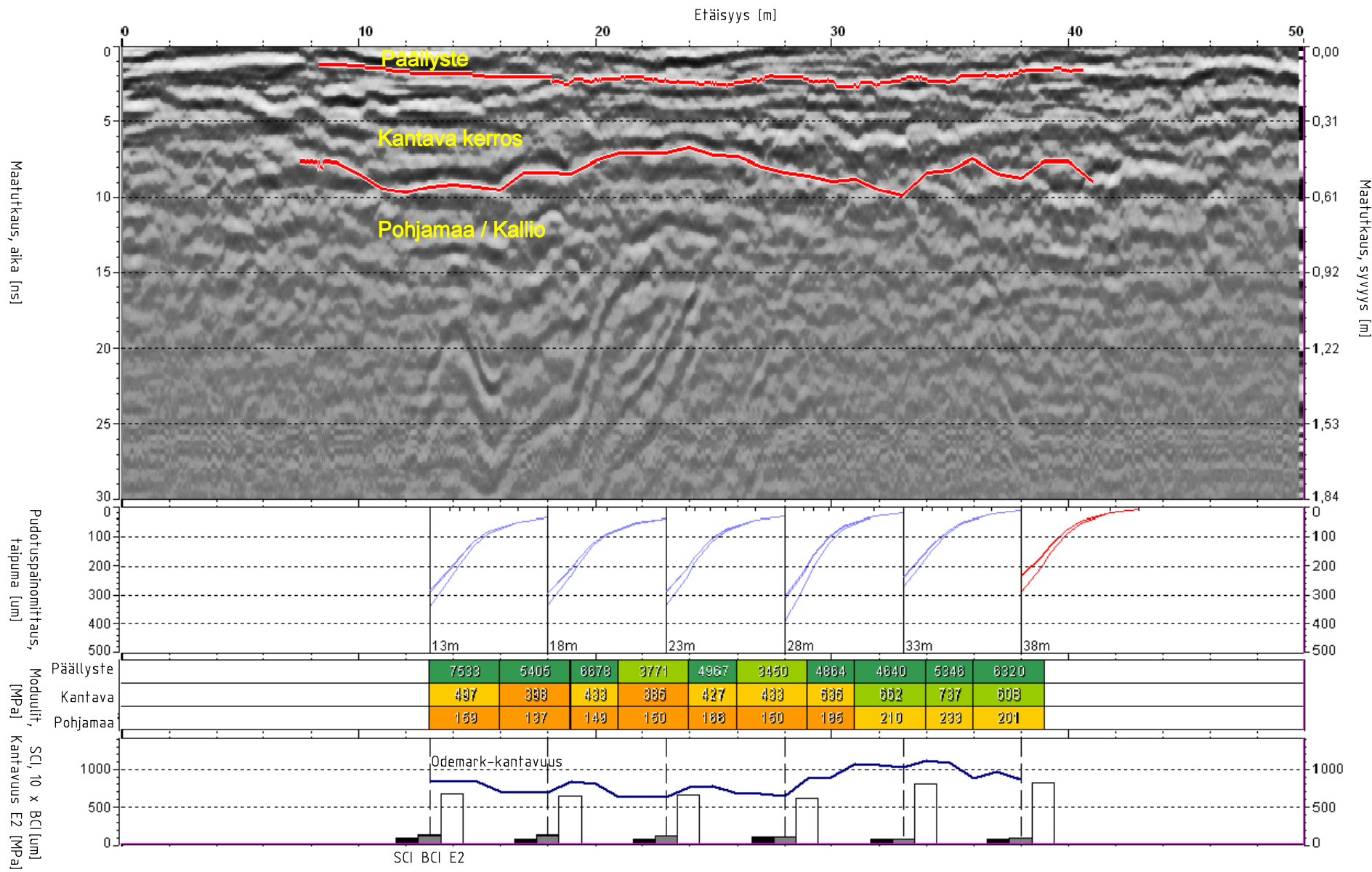




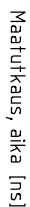


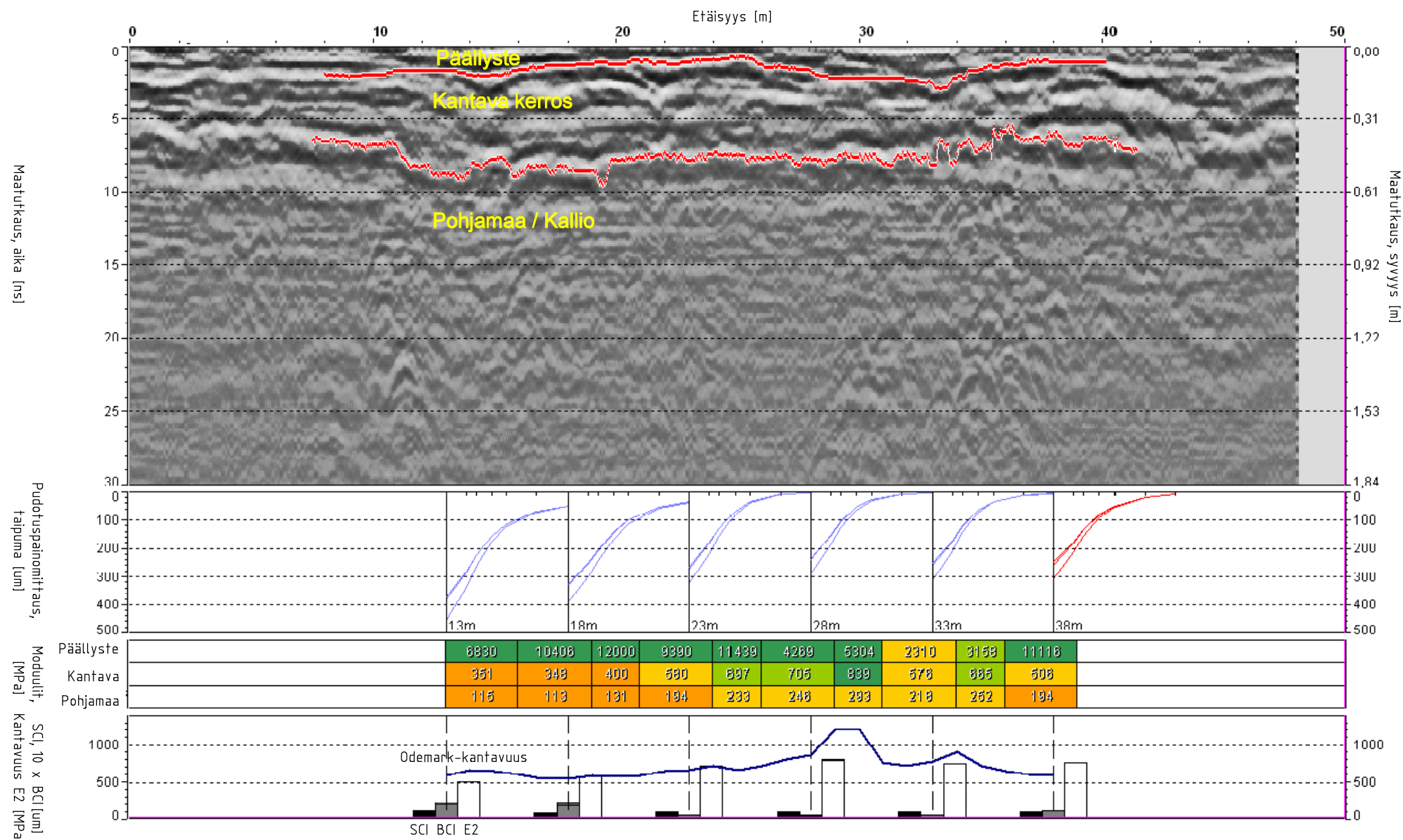
Liite M.2.3 Sompassaaren satamakenttä, linja 3

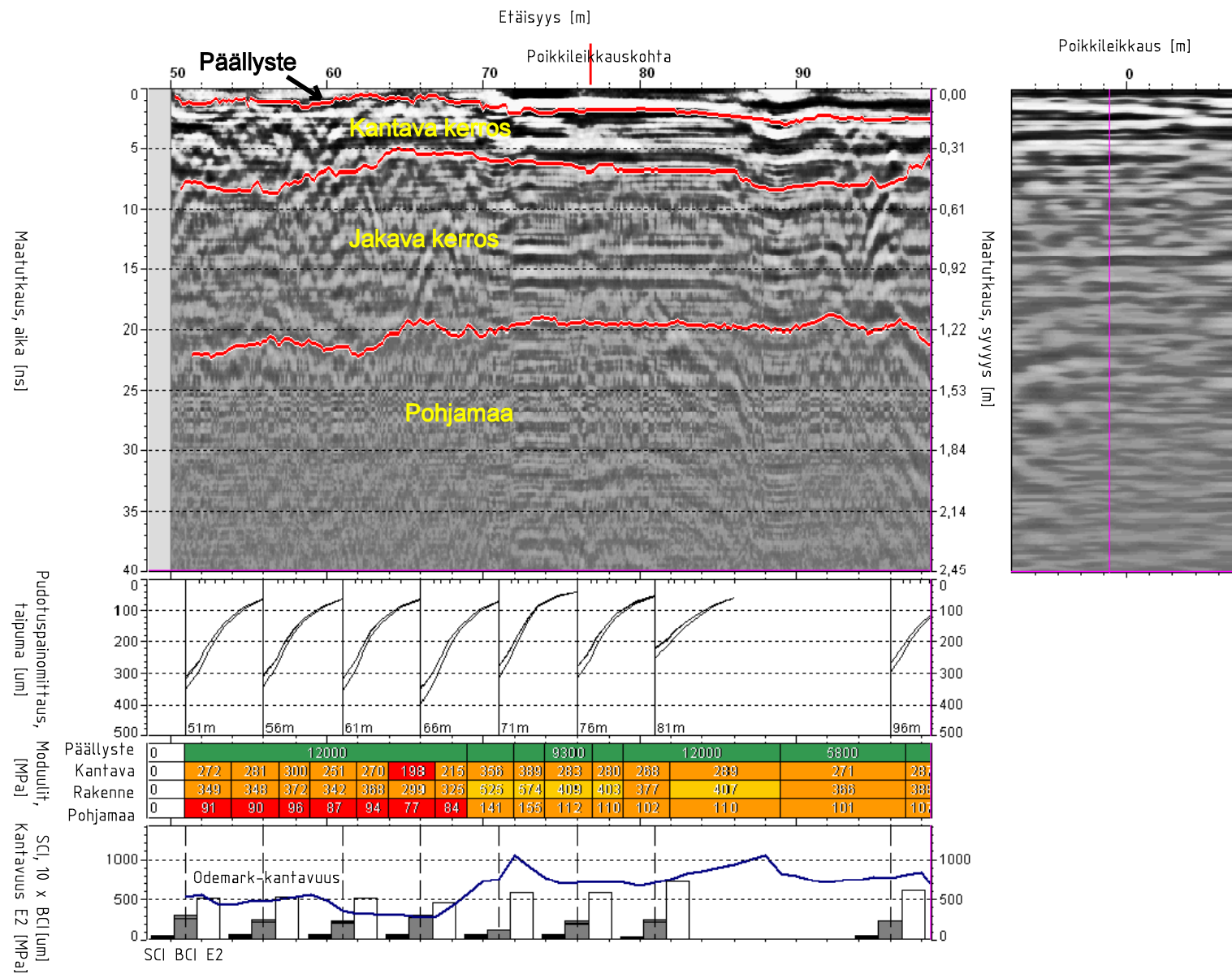




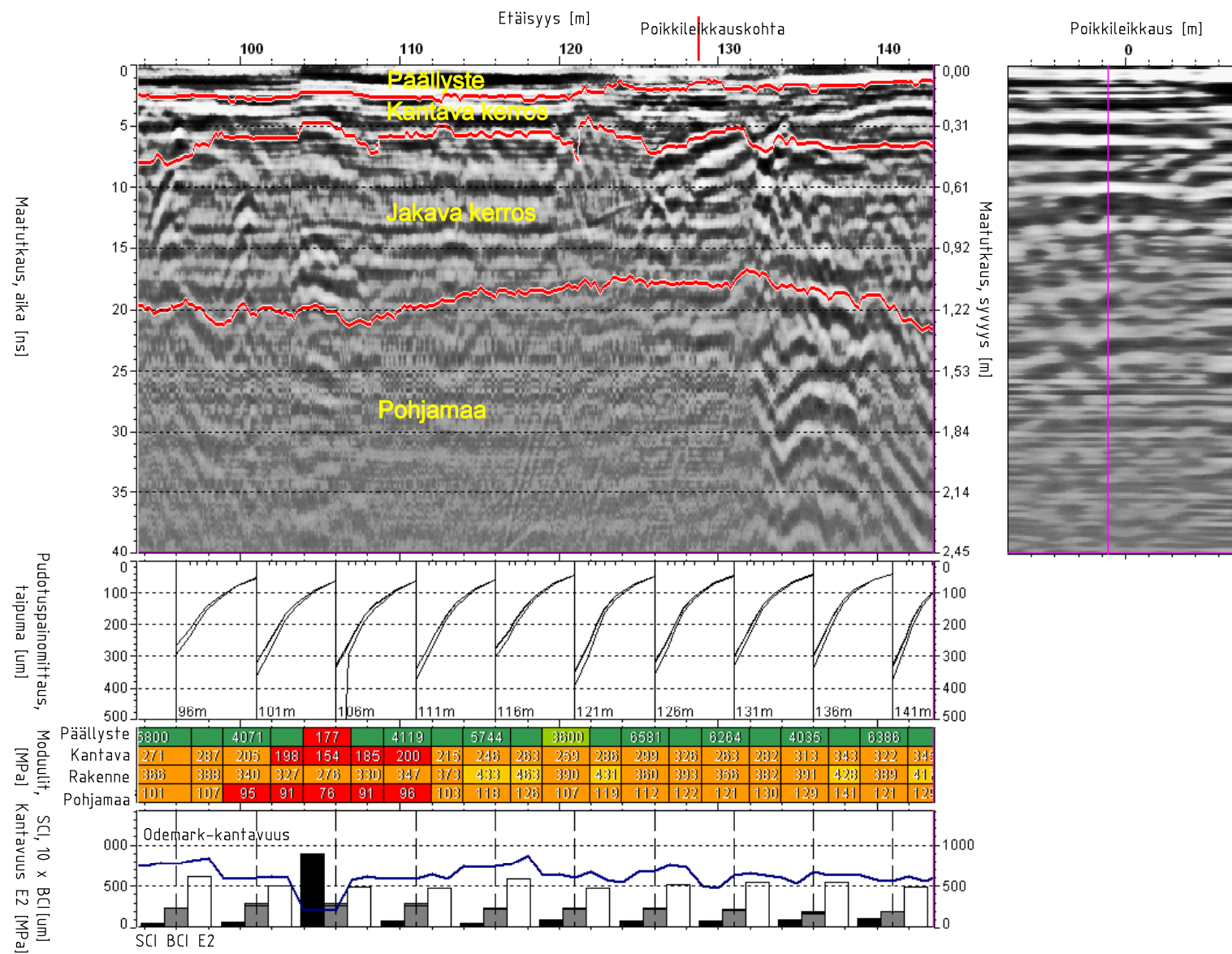






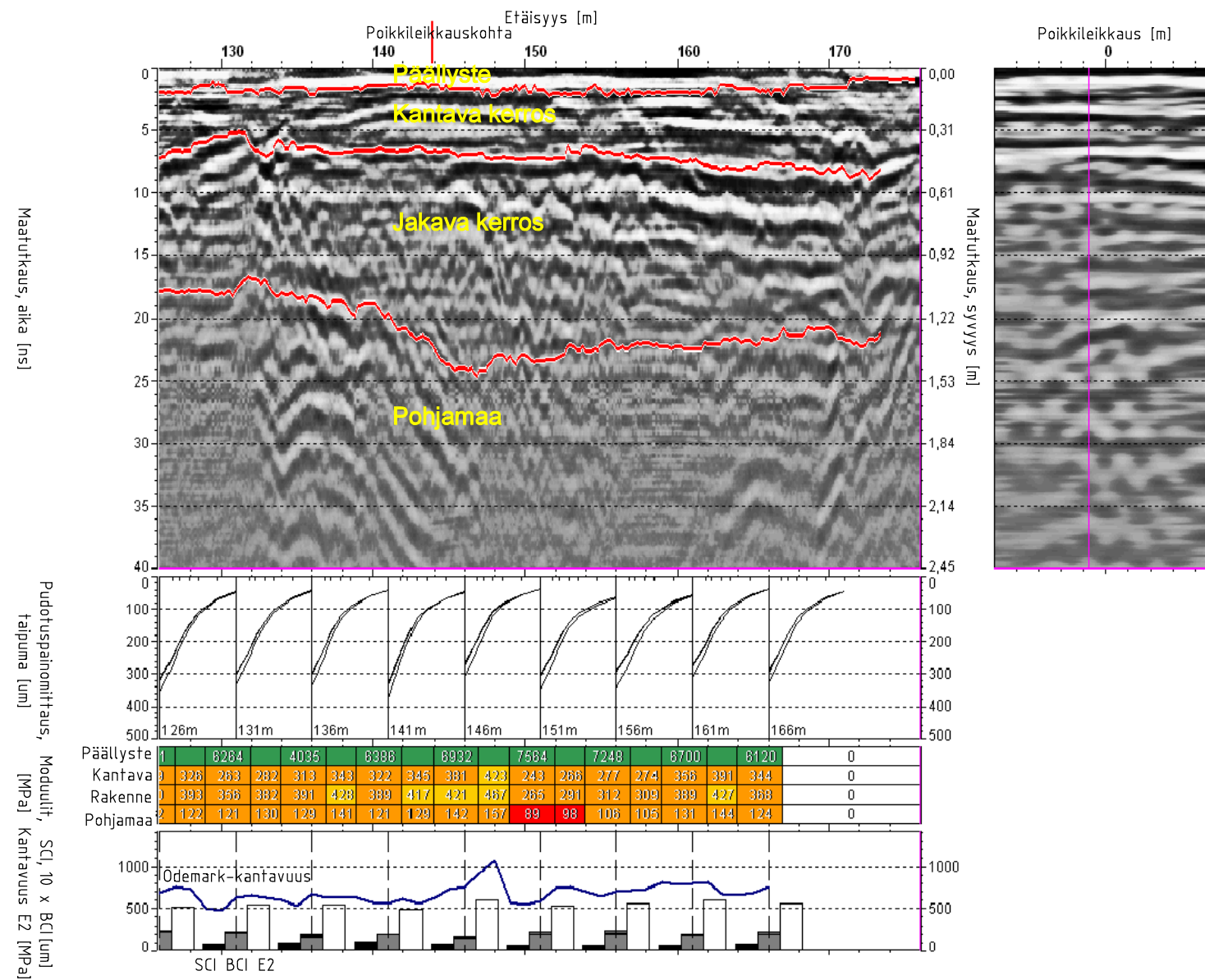


Liite M.3.1.1 Tikkurilan linja-autoterminäli, linja 1 plv 50-98

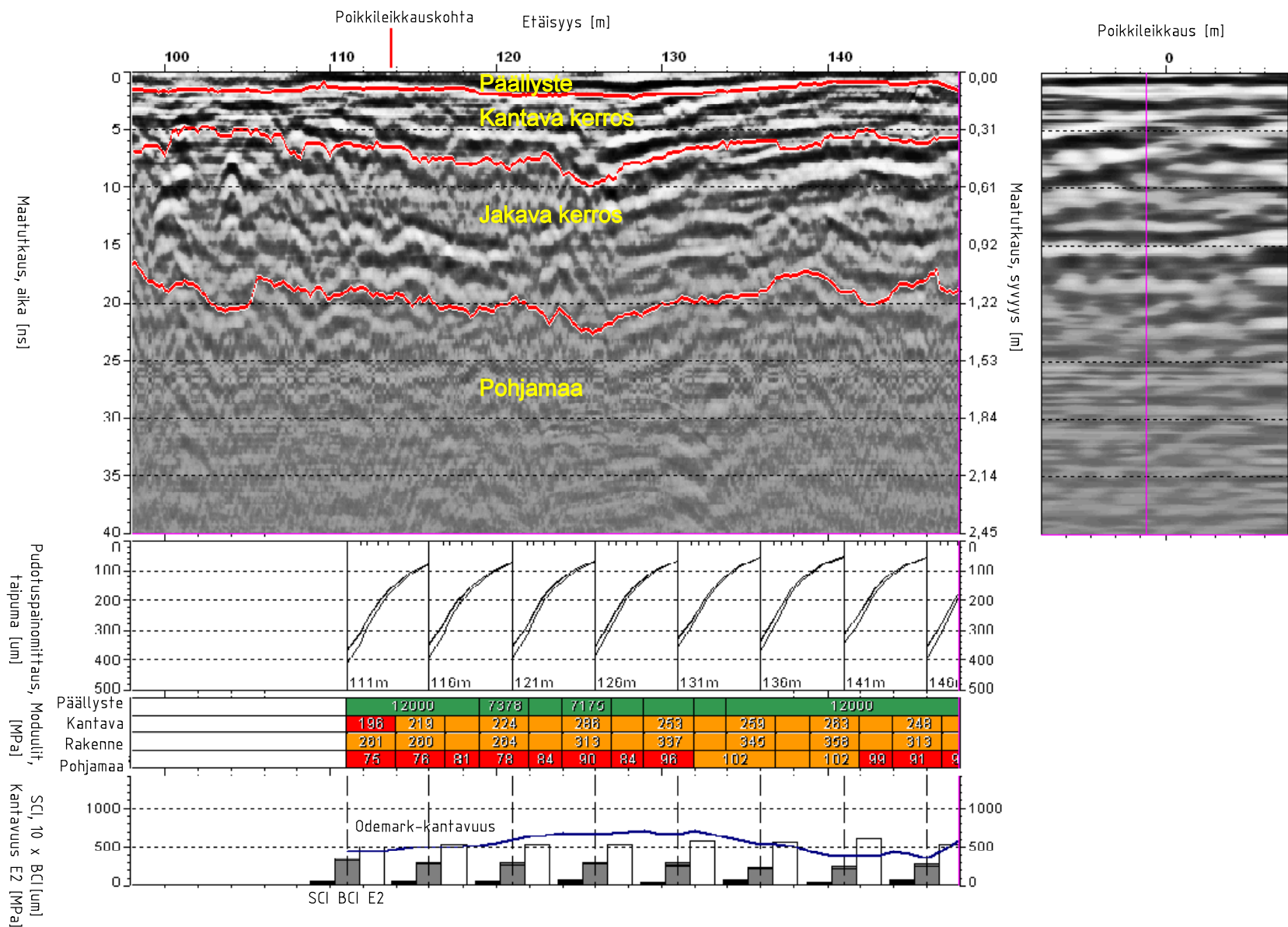


Liite M.3.1.2 Tikkurilan linja-autoterminäli, linja 1 plv 94-144





Liite M.3.1.3 Tikkurilan linja-autoterminäali, linja 1 plv 126-176

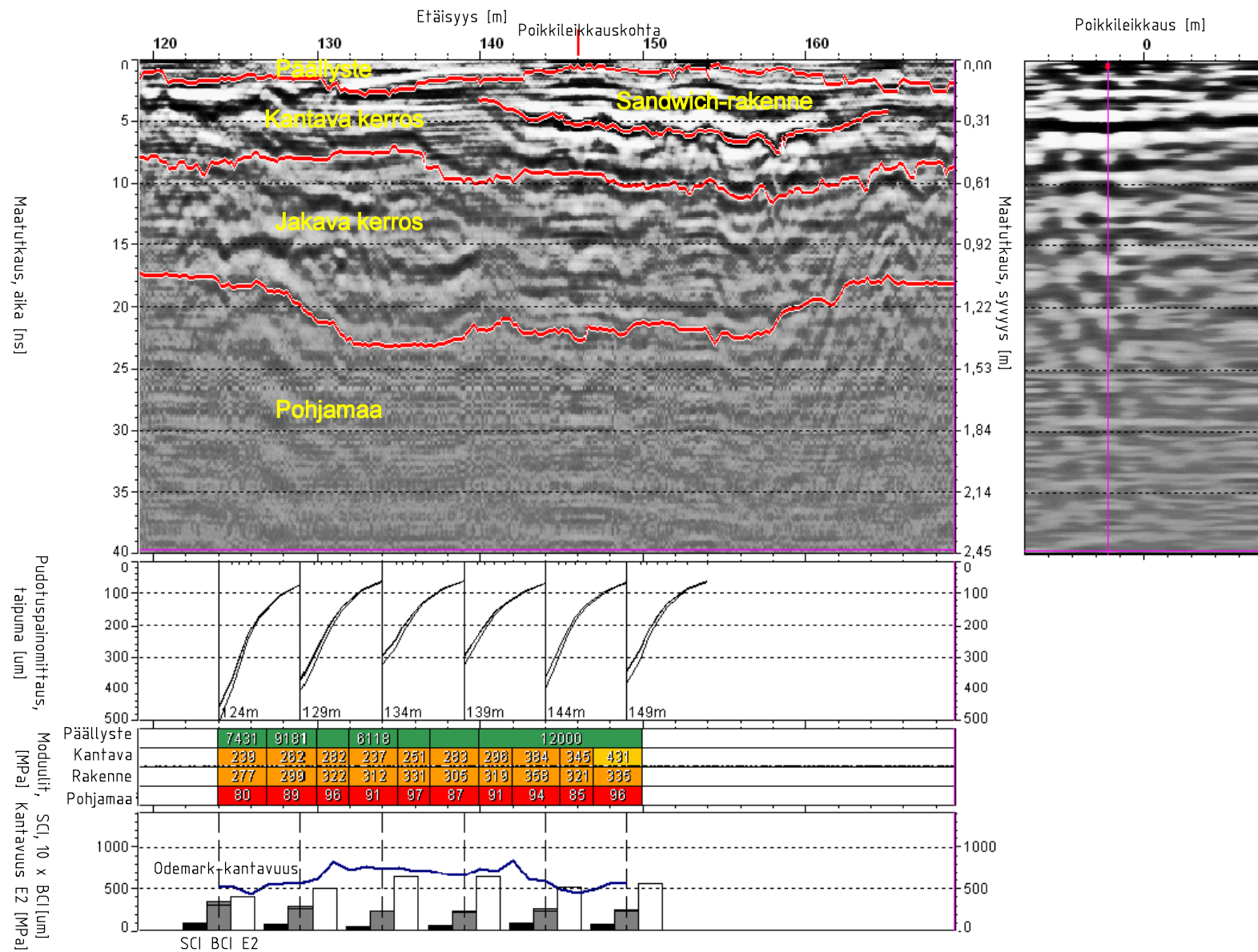


Liite M.3.2.1 Tikkurilan linja-autoterminäli, linja 2 plv 98-148

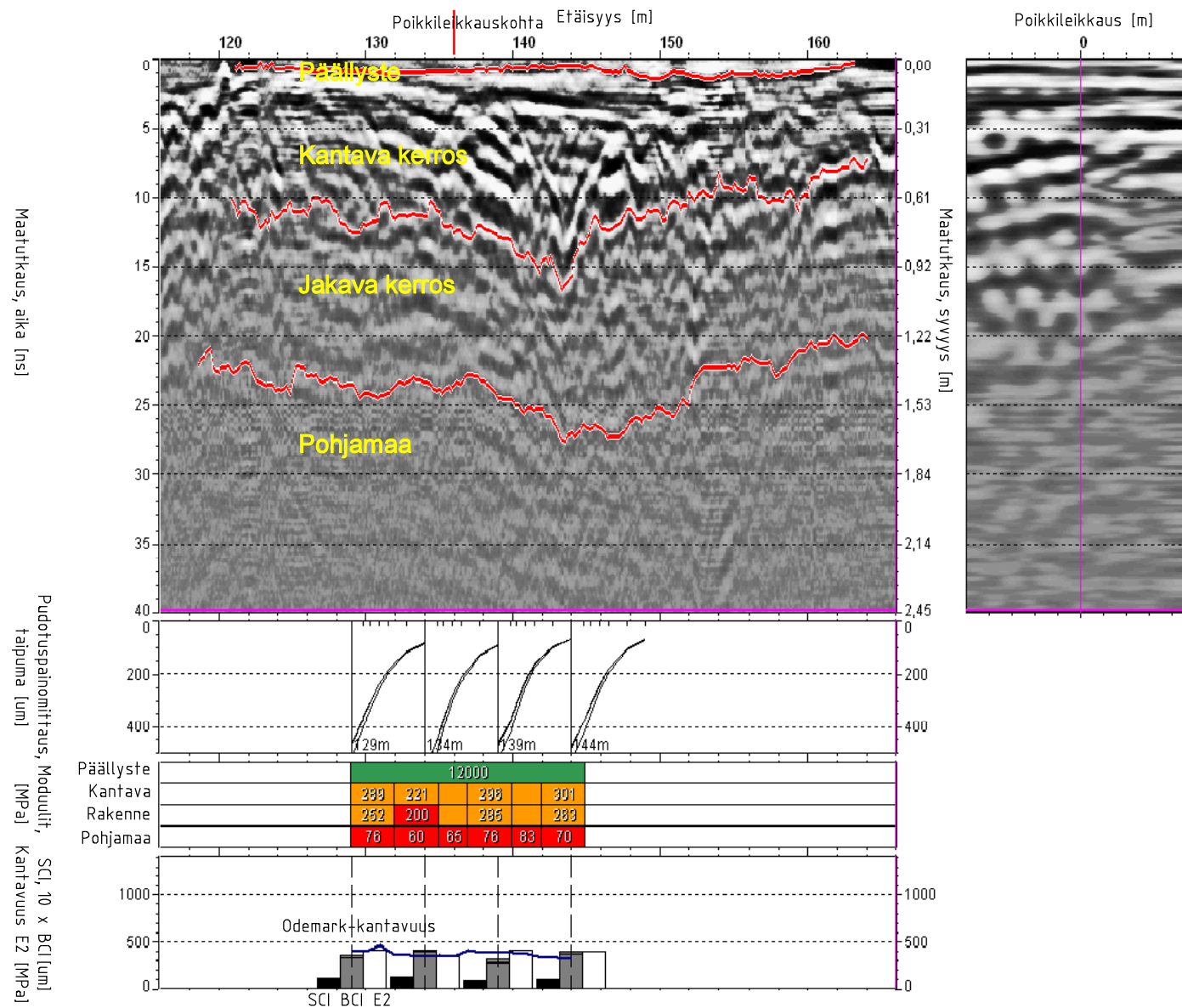
Poikkileikkaus [m]

0









Liite M.3.4 Tikkurilan linja-autoterminäli, linja 4 plv 116-166

Liite N.1 Vuosaaren sataman vaihtoehtoinen mitoitus - Asphalt Institute

|   |          |                |          |                 |          |
|---|----------|----------------|----------|-----------------|----------|
| <b>Vastapainotrukki:</b> Vastavuuskerroin kontin kanssa 5,4 |          |                |          |                 |          |
| Oma massa:  | 49500 kg | Kontin massa:  | 18000 kg | Kokonaismassa:  | 67500 kg |
| Oma kuorma:   | 486 kN   | Kontin kuorma: | 176 kN   | Kokonaiskuorma: | 662 kN   |

|  |   |                          |        |             |                  |
|--|---|--------------------------|--------|-------------|------------------|
| <b>Mitoittava akseli kuorma (etuakseli):</b> 0,93 * (486 + 176) Asphalt Instituten mukainen kaatumiskuorma (tipping load)<br>Lasketaan yleensä maksiminostokapasiteetin mukaan |   |                          |        |             |                  |
| 616 kN   |   |                          |        |             |                  |
| <b>Pyöräkuorma:</b>  | 616 / 4   | <b>Renkaiden leveys:</b> | 457 mm | (18 tuumaa) | (Svetruck, 2007) |
| 154 kN   |   |                          |        |             |                  |
| <b>Kuormituspinnan säde d/2:</b>   | 228,5 mm  |                          |        |             |                  |
| <b>Kuormituspinta-ala:</b>   | 0,164 m <sup>2</sup> (Vastaa Vuosaaren sataman mitoitusexcelin arvoa)     |                          |        |             |                  |
| <b>Kuormituspaine:</b>   | 154 kN / 0,164 m <sup>2</sup><br>939 kPa                                  |                          |        |             |                  |
| <b>Renkaiden keskeltä-keskelle väli S<sub>d</sub>:</b>   | 470 mm (Arvioitu trukista otetun kuvan ja renkaiden leveyden perusteella) |                          |        |             |                  |
| <b>Keskeltä-keskelle välin ja kuormituspinnan säteen suhde:</b>  | 2,1   |                          |        |             |                  |

|  |               |  |
|--|---------------|--|
| <b>Kuormituskerrat:</b>                      |               |  |
| KVL  | 300 std       | Vuosaaren alueen 4 standardiakseleiden kvl         |
| KKL  | 1 095 000 std | kvl * 365 * 10                                     |
| Muutettu KKL (KKL / 5,4)                     | 219000        | Muutettu vastapainotrukin kuormituksia vastaavaksi |
| Käytetään 1 000 000 kuormituskerran kuvaajaa |               |  |

|   |                                   |    |                 |     |                        |
|---|-----------------------------------|----|-----------------|-----|------------------------|
| <b>Sallitun yksikköpyörän kuvaaja:</b> (pohjamaan kantavuuksille) |                                   |    |                 |     |                        |
| 50 MPa ( 7 250 psi)   |                                   |    |                 |     |                        |
| 280 MPa (40 600 psi)  |                                   |    |                 |     |                        |
|   | <b>Kuorma</b>                     |    | <b>Jännitys</b> |     | <b>T<sub>A/a</sub></b> |
| Yksittäinen pyörä   | 154                               | kN | 939             | kPa | 2,2                    |
|   | 235                               | kN | 1433            | kPa | 2,7                    |
|   | 316                               | kN | 1927            | kPa | EI MÄÄRITETTY          |
| 60 % kuormasta  | 398                               | kN | 2427            | kPa | EI MÄÄRITETTY          |
|   | Jännitys liian suuri diagrammille |    |                 |     |                        |

Redusoidun pyöräkuorman kuvaajan muodostaminen:

Kuormituskertoimet L: (kuvaajasta)

Pohjamaan kantavuuksille

50 Mpa ( 7 250 psi)

280 Mpa (40 600 psi)

|                   | Kuorma |    | T <sub>A/a</sub> |      | L   | ESWL |    | T <sub>A/a</sub> |               | L    | ESWL |    |    |
|-------------------|--------|----|------------------|------|-----|------|----|------------------|---------------|------|------|----|----|
| Yksittäinen pyörä | 154    | kN | 2,2              | 1,05 | 293 | kN   |    | 1,6              | 1,06          | 291  | kN   |    |    |
|                   | 235    | kN | 2,7              | 1,03 | 456 | kN   |    | 2,1              | 1,05          | 448  | kN   |    |    |
|                   | 316    | kN | EI MÄÄRITETTY    |      |     |      | kN |                  | 2,6           | 1,04 | 608  | kN |    |
| 60 % kuormasta    | 398    | kN | EI MÄÄRITETTY    |      |     |      | kN |                  | EI MÄÄRITETTY |      |      |    | kN |

Redusoidut pyöräkuormat määritetyillä kuormituskertoimilla: 50 MPa (7 250 psi)

|                   | ESWL          |    | Jännitys |               | T <sub>A/a</sub> |     | T <sub>A</sub> |  |
|-------------------|---------------|----|----------|---------------|------------------|-----|----------------|--|
| Yksittäinen pyörä | 293           | kN | 1789     | kPa           | 3,0              | 686 | mm             |  |
|                   | 456           | kN | 2782     | kPa           | EI MÄÄRITETTY    |     | mm             |  |
|                   | EI MÄÄRITETTY |    | kPa      | EI MÄÄRITETTY |                  | mm  |                |  |
| 60 % kuormasta    | EI MÄÄRITETTY |    | kPa      | EI MÄÄRITETTY |                  | mm  |                |  |

Redusoidut pyöräkuormat määritetyillä kuormituskertoimilla: 280 MPa (40 600 psi)

|                   | ESWL          |    | Jännitys |               | T <sub>A/a</sub> |     | T <sub>A</sub> |  |
|-------------------|---------------|----|----------|---------------|------------------|-----|----------------|--|
| Yksittäinen pyörä | 291           | kN | 1772     | kPa           | 2,4              | 548 | mm             |  |
|                   | 448           | kN | 2729     | kPa           | EI MÄÄRITETTY    |     |                |  |
|                   | 608           | kN | 3705     | kPa           | EI MÄÄRITETTY    |     |                |  |
| 60 % kuormasta    | EI MÄÄRITETTY |    | kPa      | EI MÄÄRITETTY |                  |     |                |  |

|  |               |                              |               |
|--|---------------|------------------------------|---------------|
| <b>Vaadittu päällystepaksuus:</b> (kuvaajasta) |               |                              |               |
| Pohjamaan kantavuus 50 MPa:                    | <b>690</b> mm | Pohjamaan kantavuus 280 MPa: | <b>530</b> mm |

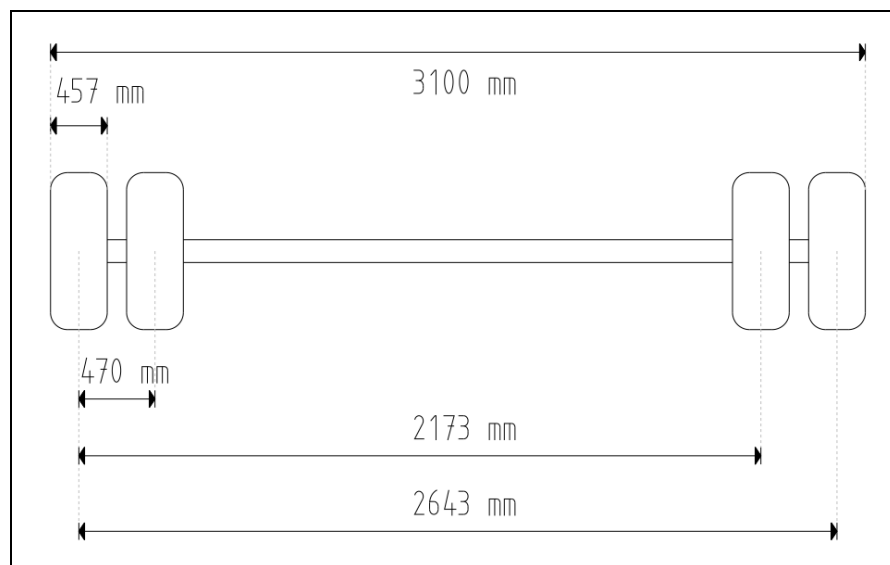
**Kuormitustiedot - pyöräkuorma:**

Etuakselin yksittäinen pyöräkuorma P: 154 kN (Asphalt Instituten mitoituksesta)  
Dynaaminen kuormituslisä  $f_d$ : 1,15 (Vuosaaren sataman mitoituksesta)  
Muutettu KKL: 219 000 (Asphalt Instituten mitoituksesta)

Käytetään 250 000 kuormituskerran mitoituskuvaajaa.

**Redusoidun pyöräkuorman laskenta:**

Käytetään ensisijaisena pyöräkuormana kuvassa N-2-1 esitetyn etuakselin ulommaista pyörää, jolle lasketaan redusoidun pyöräkuorman laskentakertoimet kolmen muun pyörän kuvassa N.2-1 esitettyjen keskeltä-keskelle -välien perusteella. Akselin yläpuolella näkyvät arvot renkaan leveydelle ja akselin leveydelle on määritetty Svetruckin (2007) teknisistä tiedoista. Paripyörien keskeltä-keskelle -väli on renkaan leveyden ja vastapainotrukin kuvan (kuva 74) perusteella tehty arvio.



Kuva N-2-1. Mitoitusakseli.

Renkaiden keskeltä-keskelle -välit 470, 2173 ja 2643 mm.

**Tehollinen syvyys  $h_{\text{eff}}$ :**

Pohjamaaluokalla J (50 MPa): Pohjamaaluokalla N (280 MPa):

$$h_{\text{eff}} = 300 \times \sqrt[3]{\frac{35000}{10 \times \text{CBR}}} \quad h_{\text{eff}} = 300 \times \sqrt[3]{\frac{35000}{50}} \approx 2664 \quad h_{\text{eff}} = 300 \times \sqrt[3]{\frac{35000}{280}} = 1500$$

**Kantavan kerroksen maabetonin vetojännitykset ja redusoidun pyöräkuorman laskentakertoimet WPF:**

Pohjamaaluokalla J vetojännitysten laskentasyvyys  $z$  on 2664 mm ja pohjamaaluokalla N 1500 mm lasketun tehollisen syvyyden mukaan.

$$\sigma_R = \frac{P}{2 \times \pi} \times \left( \frac{3 \times S_d^2 \times z}{\alpha^{5/2}} - \frac{1 - 2 \times \nu}{\alpha + z \times \sqrt{\alpha}} \right)$$

$$\sigma_T = \frac{P}{2 \times \pi} \times (1 - 2 \times \nu) \times \left( \frac{z}{\alpha^{3/2}} - \frac{1}{\alpha + z \times \sqrt{\alpha}} \right)$$

$$WPF = \frac{\sigma_R + \sigma_T}{\sigma_R}$$

Lasketaan vetojännitykset etuakselin paripyörän alla ja käytetään Poisson-luvun arvoa 0,35, jota on käytetty myös CBI:n mitoitusohjeen BISAR -laskennoissa. Laskennat suoritetaan Excel-taulukkolaskentaohjelmalla.

Laskentakertoimien arvot: Laskentasyvyys 2664 mm. (Pohjamaaluokka J)

|                                 |                     |
|---------------------------------|---------------------|
| Keskeltä-keskelle -väli 470 mm  | WPF $\approx$ -1,33 |
| Keskeltä-keskelle -väli 2173 mm | WPF $\approx$ 1,08  |
| Keskeltä-keskelle -väli 2643 mm | WPF $\approx$ 1,04  |

Laskentakertoimien arvot: Laskentasyvyys 1500 mm. (Pohjamaaluokka N)

|                                 |                    |
|---------------------------------|--------------------|
| Keskeltä-keskelle -väli 470 mm  | WPF $\approx$ 2,30 |
| Keskeltä-keskelle -väli 2173 mm | WPF $\approx$ 0,98 |
| Keskeltä-keskelle -väli 2643 mm | WPF $\approx$ 0,94 |

Alle yhden jäävä laskentakertoimen arvo tarkoittaa periaatteessa sitä, että kyseisen renkaan kuormaa ei oteta laskennassa huomioon. Sen sijaan yli kahden oleva laskentakertoimen arvo on teorian kannalta mahdoton, koska silloin kauempana olevan pyörän kuorma olisi ensisijaista pyöräkuormaa merkittävämpi. Lisäksi laskentatulokset tarkoittaa periaatteessa sitä, että paremmin kantavalla pohjamaalla tulisi käyttää suurempaa mitoituskuormaa kuin pehmeämmällä pohjamaalla. Tuloksen vuoksi päätettiin tehdä vertailulaskenta mitoitusohjeessa esitetyn laskentakertoimen määritystaulukon arvoilla. Vertailulaskentoihin Poisson-luvun arvoksi muutettiin 0,40, koska se antoi ainakin 1000 mm:n laskentasyvyydellä samansuuntaisia arvoja kuin mitoitusohjeen taulukko. Laskentatulokset on esitetty taulukossa N-2.1.



Taulukko N.2-1 Laskentakertoimien vertailu. Vasemmalla mitoitusohjeen taulukossa esitetyt arvot ja oikealla vaihtoehtoisen mitoituksen yhteydessä laskennallisesti määritetyt arvot

| K-k -väli<br>[mm] | Tehollinen syvyys $h_{eff}$ (laskentasyvyys) |         |         | K-k -väli<br>[mm] | Laskentasyvyydet $z$ [mm] |       |       |
|-------------------|--|---------|---------|-------------------|---------------------------|-------|-------|
|                   | 1000 mm                                      | 2000 mm | 3000 mm |                   | 1000                      | 2000  | 3000  |
| 300               | 1,82   | 1,95    | 1,98    | 300               | 1,66                      | -1,76 | -0,40 |
| 600               | 1,47   | 1,82    | 1,91    | 600               | 1,11                      | 1,66  | 8,82  |
| 900               | 1,19   | 1,65    | 1,82    | 900               | 1,04                      | 1,21  | 1,66  |
| 1200              | 1,02   | 1,47    | 1,71    | 1200              | 1,01                      | 1,11  | 1,29  |
| 1800              | 1,00   | 1,19    | 1,47    | 1800              | 0,96                      | 1,04  | 1,11  |
| 2400              | 1,00   | 1,02    | 1,27    | 2400              | 0,92                      | 1,01  | 1,05  |
| 3600              | 1,00   | 1,00    | 1,02    | 3600              | 0,82                      | 0,96  | 1,01  |
| 4800              | 1,00   | 1,00    | 1,00    | 4800              | 0,70                      | 0,92  | 0,98  |

Taulukoita vertailtaessa huomataan, että alle yhden jäävät arvot saavan arvon 1,00 eli ne eivät lisää mitoituskuormaa. Sen sijaan laskennassa määritetyt negatiiviset arvot ja arvo 8,82 eivät ole millään tavalla teorian mukaisia. Nopean herkkyyksianalyysin perusteella suurilla laskentasyvyyksillä tai vastaavasti pienillä k-k -välin arvoilla pienikin muutos joko laskentasyvyydessä, k-k -välissä tai Poisson-luvussa muuttaa laskentatulosta merkittävästi. Laskentakaavat ovat siis toimivia ainoastaan rajatulla jännitysalueella. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että laskennallisesti määritetyt laskentakertoimen arvot eivät ole luotettavia tai ainakin niiden käytössä pitää arvioida tuloksen järkevyyttä. Interpaven mitoitusohjeessa ei ole selvitetty, millä tavalla laskentakertoimen arvot on määritetty pienillä k-k -väleillä ja suurilla laskentasyvyyksillä. Mitoitusohjeen laskentaesimerkeissä kerroin määritetään laskentataulukosta interpoloimalla. Tässä tutkimuksessa päädyttiin lopulta samaan määrittystapaan, ja saatiin seuraavat laskentakertoimen arvot:

Laskentakertoimien arvot: Laskentasyvyys 2664 mm. (Pohjamaaluokka J)

Keskeltä-keskelle -väli 470 mm WPF  $\approx$  1,92  
 Keskeltä-keskelle -väli 2173 mm WPF  $\approx$  1,23  
 Keskeltä-keskelle -väli 2643 mm WPF  $\approx$  1,11

Laskentakerroin: WPF (pohjamaa J) = 1,00 + 0,92 + 0,23 + 0,11 = 2,26

Laskentakertoimien arvot: Laskentasyvyys 1500 mm. (Pohjamaaluokka N)

Keskeltä-keskelle -väli 470 mm WPF  $\approx$  1,82  
 Keskeltä-keskelle -väli 2173 mm WPF  $\approx$  1,05  
 Keskeltä-keskelle -väli 2643 mm WPF  $\approx$  1,01

Laskentakerroin: WPF (pohjamaa N) = 1,00 + 0,82 + 0,05 + 0,01 = 1,88

**Mitoituskuorma:** (Pyöräkuorma \* dynaaminen kuormituslisä \* WPF)

$$P (\text{pohjamaa J}) = 154 \text{ kN} * 1,15 * 2,26 = 400 \text{ kN}$$

$$P (\text{pohjamaa N}) = 154 \text{ kN} * 1,15 * 1,88 = 333 \text{ kN}$$

**Rakennekerrosten mitoitus:**

Tukikerros: Ei tarvita kummassakaan.

Hiekkapohjalla mahdollisesti 4 % CBR-arvon vaatima 250 mm tukikerros on työtekniisesti kannattava. Toisaalta kantavuusarvo 50 MPa vastaa Vuosaaren sataman pudotustiivistettyä alustaa, jolla oli riittävä kantavuus työkoneille.

Kantava kerros (mitoituskuvaajasta):

Pohjamaaluokalle J (E = 50 MPa): 400 mm

Pohjamaaluokalle N (E = 280 MPa): 330 mm

**Mitoitetut rakenteet:**

Alkuperäinen rakenne, kantava kerros maabetonia:

| Rakennekerros (mm)            | Pohjamaaluokalle |            |
|-------------------------------|------------------|------------|
|                               | J                | N          |
| Betoninen sidekivi            | 80               | 80         |
| Asennushiekka                 | 30               | 30         |
| Kantava kerros, maabetoni     | 400              | 330        |
| <u>Jakava kerros</u>          | <u>150</u>       | <u>150</u> |
| <b>Kokonaisrakennepaksuus</b> | <b>660</b>       | <b>590</b> |

Vaihtoehtoinen rakenne, kantava kerros kalliomursketta (vastaavuuskerroin 3,0):

| Rakennekerros (mm)            | Pohjamaaluokalle |             |
|-------------------------------|------------------|-------------|
|                               | J                | N           |
| Betoninen sidekivi            | 80               | 80          |
| Asennushiekka                 | 30               | 30          |
| Kantava kerros, kalliomurske  | 1200             | 990         |
| <u>Jakava kerros</u>          | <u>150</u>       | <u>150</u>  |
| <b>Kokonaisrakennepaksuus</b> | <b>1460</b>      | <b>1250</b> |

**Kuormitustiedot - konttikuormat:**

|                         |          |
|-------------------------|----------|
| Konttiryhmä x 1 kontti  | 304,8 kN |
| Konttiryhmä x 2 konttia | 548,6 kN |
| Konttiryhmä x 3 konttia | 731,5 kN |

**Rakennekerrosten mitoitus:**

Tukikerros: Ei tarvita kummassakaan

Hiekkapohjalla mahdollisesti 4 % CBR-arvon vaatima 250 mm tukikerros on työtekniisesti kannattava. Toisaalta kantavuusarvo 50 MPa vastaa Vuosaaren sataman pudotustiivistettyä alustaa, jolla oli riittävä kantavuus työkoneille.

Kantava kerros (mitoituskuvaajasta):

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| Konttiryhmä x 1 kontti  | 290 mm |
| Konttiryhmä x 2 konttia | 460 mm |
| Konttiryhmä x 3 konttia | 540 mm |

**Mitoitetut rakenteet:**

| Rakennekerros [mm]            | Ryhmä x 1  | Ryhmä x 2  | Ryhmä x 3  |
|-------------------------------|------------|------------|------------|
| Betoninen sidekivi            | 80         | 80         | 80         |
| Asennushiekka                 | 30         | 30         | 30         |
| Kantava kerros, maabetoni     | 290        | 460        | 540        |
| Jakava kerros                 | 150        | 150        | 150        |
| <b>Kokonaisrakennepaksuus</b> | <b>550</b> | <b>720</b> | <b>800</b> |

**Vaihtoehtoiset rakenteet (vastaavuuskertoimella 3,0):**

| Rakennekerros [mm]            | Ryhmä x 1   | Ryhmä x 2   | Ryhmä x 3   |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Betoninen sidekivi            | 80          | 80          | 80          |
| Asennushiekka                 | 30          | 30          | 30          |
| Kantava kerros, murske        | 870         | 1380        | 1620        |
| Jakava kerros                 | 150         | 150         | 150         |
| <b>Kokonaisrakennepaksuus</b> | <b>1130</b> | <b>1640</b> | <b>1880</b> |

### Kuormitustiedot:

|                                      |         |
|--------------------------------------|---------|
| Vastapainotrukki (Svetruck 42120-57) | 896 kN  |
| Pyöräkuormaaja (Cat 980C)            | 294 kN  |
| Muutettu kuormituskertaluku          | 219 000 |

Käytetään 300 000 kuormituskerran mitoitustaulukkoa (Silfwerbrand, 2005)

Kuormituspaineet (taulukko 9):

|                         |          |
|-------------------------|----------|
| Konttiryhmä x 1 kontti  | 2,64 MPa |
| Konttiryhmä x 2 konttia | 4,76 MPa |
| Konttiryhmä x 3 konttia | 6,34 MPa |

### Kantavan asfalttibetonikerroksen mitoitus (taulukko 11):

|                    |        |
|--------------------|--------|
| Pyöräkuormaimelle  | 150 mm |
| Vastapainotrukille | 200 mm |
| Konttikuormille    | 150 mm |

### Jakavan kerroksen mitoitus:

#### Pyöräkuormat:

|   |         |         |
|---|---------|---------|
| Pohjamaaluokalle N (materiaalityyppi 1):  | Pyöräk. | Trukki  |
| Kantava ja jakava kerros kalliomursketta  | 200 mm  | 700 mm  |
| Kantava yläosa AB, alaosa ja jakava KaM   | 0 mm    | 400 mm  |
| Kantava kalliomurske, jakava betonimurske | 150 mm  | 600 mm  |
| Pohjamaaluokalle J (materiaalityyppi 4):  | Pyöräk. | Trukki  |
| Kantava ja jakava kerros kalliomursketta  | 540 mm  | 1150 mm |
| Kantava yläosa AB, alaosa ja jakava KaM   | 240 mm  | 850 mm  |
| Kantava kalliomurske, jakava betonimurske | 380 mm  | 950 mm  |

#### Konttikuormat:

|   |           |           |           |
|---|-----------|-----------|-----------|
| Pohjamaaluokalle N (materiaalityyppi 1):  | Ryhmä x 1 | Ryhmä x 2 | Ryhmä x 3 |
| Kantava ja jakava kerros kalliomursketta  | 700 mm    | 1060 mm   | 1280 mm   |
| Kantava yläosa AB, alaosa ja jakava KaM   | 540 mm    | 900 mm    | 1120 mm   |
| Kantava kalliomurske, jakava betonimurske | 560 mm    | 840 mm    | 1010 mm   |
| Pohjamaaluokalle J (materiaalityyppi 4):  | Ryhmä x 1 | Ryhmä x 2 | Ryhmä x 3 |
| Kantava ja jakava kerros kalliomursketta  | 1240 mm   | 1720 mm   | 1760 mm   |
| Kantava yläosa AB, alaosa ja jakava KaM   | 1070 mm   | 1570 mm   | 1600 mm   |
| Kantava kalliomurske, jakava betonimurske | 880 mm    | 1320 mm   | 1560mm    |

**Mitoitetut rakenteet raskaille pyöräkuormille:**

|                              | Pohjamaaluokka N |        | Pohjamaaluokka J |        |
|------------------------------|------------------|--------|------------------|--------|
| Rakennekerros [mm]           | Pyöräk.          | Trukki | Pyöräk.          | Trukki |
| Betoninen sidekivi           | 100              | 100    | 100              | 100    |
| Asennushiekka                | 30               | 30     | 30               | 30     |
| Kantava kerros, kalliomurske | 150              | 150    | 150              | 150    |
| Jakava kerros, kalliomurske  | 200              | 700    | 540              | 1150   |

**Kokonaisrakennepaksuus                      480                      980                      820                      1430**

|                                | Pohjamaaluokka N |        | Pohjamaaluokka J |        |
|--------------------------------|------------------|--------|------------------|--------|
| Rakennekerros [mm]             | Pyöräk.          | Trukki | Pyöräk.          | Trukki |
| Betoninen sidekivi             | 100              | 100    | 100              | 100    |
| Asennushiekka                  | 30               | 30     | 30               | 30     |
| Kantava kerros, asfalttibetoni | 150              | 200    | 150              | 200    |
| Kantava kerros, kalliomurske   | 150              | 150    | 150              | 150    |
| Jakava kerros, kalliomurske    | 0                | 400    | 240              | 850    |

**Kokonaisrakennepaksuus                      430                      880                      670                      1330**

|                              | Pohjamaaluokka N |        | Pohjamaaluokka J |        |
|------------------------------|------------------|--------|------------------|--------|
| Rakennekerros [mm]           | Pyöräk.          | Trukki | Pyöräk.          | Trukki |
| Betoninen sidekivi           | 100              | 100    | 100              | 100    |
| Asennushiekka                | 30               | 30     | 30               | 30     |
| Kantava kerros, kalliomurske | 150              | 150    | 150              | 150    |
| Jakava kerros, betonimurske  | 150              | 600    | 380              | 950    |

**Kokonaisrakennepaksuus                      430                      880                      660                      1230**

**Mitoitetut rakenteet konttikuormille:**

**Pohjamaaluokalle N:**

**Kantava ja jakava kerros kalliomursketta:**

| Rakennekerros [mm]            | Kontteja päällekkäin |             |             |
|-------------------------------|----------------------|-------------|-------------|
|                               | x 1                  | x 2         | x 3         |
| Betoninen sidekivi            | 100                  | 100         | 100         |
| Asennushiekka                 | 30                   | 30          | 30          |
| Kantava kerros, kalliomurske  | 150                  | 150         | 150         |
| Jakava kerros, kalliomurske   | 700                  | 1060        | 1280        |
| <b>Kokonaisrakennepaksuus</b> | <b>980</b>           | <b>1340</b> | <b>1560</b> |

**Kantavan kerroksen yläosa asfalttibetonia, alaosa ja jakava kerros kalliomursketta:**

| Rakennekerros [mm]             | Kontteja päällekkäin |             |             |
|--------------------------------|----------------------|-------------|-------------|
|                                | x 1                  | x 2         | x 3         |
| Betoninen sidekivi             | 100                  | 100         | 100         |
| Asennushiekka                  | 30                   | 30          | 30          |
| Kantava kerros, asfalttibetoni | 150                  | 150         | 150         |
| Kantava kerros, kalliomurske   | 150                  | 150         | 150         |
| Jakava kerros, kalliomurske    | 540                  | 900         | 1120        |
| <b>Kokonaisrakennepaksuus</b>  | <b>970</b>           | <b>1330</b> | <b>1550</b> |

**Kantava kerros kalliomursketta ja jakava kerros betonimursketta:**

| Rakennekerros [mm]            | Kontteja päällekkäin |             |             |
|-------------------------------|----------------------|-------------|-------------|
|                               | x 1                  | x 2         | x 3         |
| Betoninen sidekivi            | 100                  | 100         | 100         |
| Asennushiekka                 | 30                   | 30          | 30          |
| Kantava kerros, kalliomurske  | 150                  | 150         | 150         |
| Jakava kerros, betonimurske   | 560                  | 840         | 1010        |
| <b>Kokonaisrakennepaksuus</b> | <b>840</b>           | <b>1120</b> | <b>1290</b> |

**Pohjamaaluokalle J:**

**Kantava ja jakava kerros kalliomursketta:**

| Rakennekerros [mm]            | Kontteja päällekkäin |             |             |
|-------------------------------|----------------------|-------------|-------------|
|                               | x 1                  | x 2         | x 3         |
| Betoninen sidekivi            | 100                  | 100         | 100         |
| Asennushiekka                 | 30                   | 30          | 30          |
| Kantava kerros, kalliomurske  | 150                  | 150         | 150         |
| Jakava kerros, kalliomurske   | 1240                 | 1720        | 1760        |
| <b>Kokonaisrakennepaksuus</b> | <b>1520</b>          | <b>2000</b> | <b>2040</b> |

**Kantavan kerroksen yläosa asfalttibetonia, alaosa ja jakava kerros kalliomursketta:**

| Rakennekerros [mm]             | Kontteja päällekkäin |             |             |
|--------------------------------|----------------------|-------------|-------------|
|                                | x 1                  | x 2         | x 3         |
| Betoninen sidekivi             | 100                  | 100         | 100         |
| Asennushiekka                  | 30                   | 30          | 30          |
| Kantava kerros, asfalttibetoni | 150                  | 150         | 150         |
| Kantava kerros, kalliomurske   | 150                  | 150         | 150         |
| Jakava kerros, kalliomurske    | 1070                 | 1570        | 1600        |
| <b>Kokonaisrakennepaksuus</b>  | <b>1500</b>          | <b>2000</b> | <b>2030</b> |

**Kantava kerros kalliomursketta ja jakava kerros betonimursketta:**

| Rakennekerros [mm]            | Kontteja päällekkäin |             |             |
|-------------------------------|----------------------|-------------|-------------|
|                               | x 1                  | x 2         | x 3         |
| Betoninen sidekivi            | 100                  | 100         | 100         |
| Asennushiekka                 | 30                   | 30          | 30          |
| Kantava kerros, kalliomurske  | 150                  | 150         | 150         |
| Jakava kerros, betonimurske   | 880                  | 1320        | 1560        |
| <b>Kokonaisrakennepaksuus</b> | <b>1160</b>          | <b>1600</b> | <b>1840</b> |

Liite N.4 Vuosaaren sataman vaihtoehtoinen mitoitus - APAS, 1 kontti

Pitkäaikaikuormille on käytetty CBI:n mitoitusaulukoiden laskennassa käytettyjä arvoja staattisia jäykkyyssmoduulin arvoja. Mitoituskriteerinä oli pohjamaan pystysuuntainen puristusmuodonmuutos 2400 µs.

|                     |                      |                     |                |                         |                    |                  |
|---------------------|----------------------|---------------------|----------------|-------------------------|--------------------|------------------|
| JP-Transplan Oy     |                      | STRESS-TULOKSET     |                | 06-04-2011              |                    |                  |
| 27FE-7277-7B4E-2600 |                      |                     |                |                         |                    |                  |
| Kohde: Vuosaari     |                      | Rakenne: Pohjamaa J |                | kyk16                   |                    |                  |
| Laskentatiedot      |                      |                     |                |                         |                    |                  |
| Rakenne             |                      |                     |                |                         |                    |                  |
| Kerros              | E-moduuli<br>[MN/m²] | Paksuus<br>[cm]     | Poisson        | Isotropia<br>[iso/anis] | Sidonta<br>[0...1] |                  |
| *AB_staattine       | 1 150                | 6                   | 0,35           | iso                     | 1,00               |                  |
| *KaM_Staat.         | 2 150                | 10                  | 0,35           | iso                     | 1,00               |                  |
| *Jkv_M_Staa         | 3 117                | 30                  | 0,35           | iso                     | 1,00               |                  |
| *Mhiekka_St.        | 4 10                 | 34                  | 0,35           | iso                     | 1,00               |                  |
| *Hk50_staatt.       | 10                   |                     | 0,35           | iso                     |                    |                  |
| Kuormitustiedot     |                      |                     |                |                         |                    |                  |
| Kuorma              | Paino<br>[kN]        | Säde<br>[cm]        | Paine<br>[kPa] | - X -<br>[cm]           | - Y -<br>[cm]      | Nopeus<br>[km/h] |
| 1 kontti            | 1 76                 | 9,6                 | 2 640          | 0                       | 0                  |                  |

| <b>Laskentatulokset</b> (Vuosaari / Pohjamaa J) |                        |                    |         |         |                       |         |         |                                 |                          |
|---|------------------------|--------------------|---------|---------|-----------------------|---------|---------|---------------------------------|--------------------------|
| <b>Sijainti 1</b>                               |                        | <b>X= 0,000</b>    |         |         | <b>Y= 0,000</b>       |         |         |                                 |                          |
| <b>Kerros</b>                                   | <b>Syvyys<br/>[cm]</b> | <b>Venymä [µs]</b> |         |         | <b>Jännitys [kPa]</b> |         |         | <b>Jännitys-<br/>tila [kPa]</b> | <b>Siirtymä<br/>[µm]</b> |
|   |                        | x                  | y       | z       | x                     | y       | z       |                                 |                          |
| *AB_staattine                                   | 1                      | 0,0                | -4820,7 | -4820,7 | -5774,7               | -2534,0 | -2534,0 | -2640,0                         |                          |
|   |                        | 3,0                | -212,7  | -212,7  | -10406,1              | -1427,7 | -1427,7 | -2560,3                         | 5416,9                   |
|   |                        | 6,0                | 2154,2  | 2154,2  | -11534,8              | -697,4  | -697,4  | -2218,4                         | 6020                     |
| *KaM_Staat.                                     | 2                      | 6,0                | 2154,1  | 2154,1  | -11534,7              | -697,4  | -697,4  | -2218,4                         | 6020                     |
|   |                        | 11,0               | 2658,2  | 2658,2  | -8838,9               | -161,3  | -161,3  | -1438,7                         | 1766,0                   |
|   |                        | 16,0               | 2468,3  | 2468,3  | -6305,1               | 96,8    | 96,8    | -878,0                          | 5131                     |
| *Jkv_M_Staa                                     | 3                      | 16,0               | 2468,3  | 2468,3  | -7333,8               | -28,5   | -28,5   | -878,0                          | 5131                     |
|   |                        | 31,0               | 1222,9  | 1222,9  | -2533,1               | 97,2    | 97,2    | -228,3                          | 234,9                    |
|   |                        | 46,0               | 1885,5  | 1885,5  | -2296,0               | 312,6   | 312,6   | -49,8                           | 4162                     |
| *Mhiekka_St                                     | 4                      | 46,0               | 1885,5  | 1885,5  | -5136,4               | 2,2     | 2,2     | -49,8                           | 4162                     |
|   |                        | 63,0               | 1162,2  | 1162,2  | -3243,8               | 0,7     | 0,7     | -32,0                           | 55,3                     |
|   |                        | 80,0               | 829,6   | 829,6   | -2332,3               | 0,3     | 0,3     | -23,1                           | 3007                     |
| *Hk50_staatt                                    | 5                      | 80,0               | 829,6   | 829,6   | -2332,3               | 0,3     | 0,3     | -23,1                           | 55,4                     |
|   |                        |                    |         |         |                       |         |         |                                 | 3007                     |



Liite N.4 Vuosaaren sataman vaihtoehtoinen mitoitus - APAS, 2 konttia

|  |                      |     |                     |                |                         |                    |                  |
|--|----------------------|-----|---------------------|----------------|-------------------------|--------------------|------------------|
| JP-Transplan Oy<br>27FE-7277-7B4E-2600 |                      |     | STRESS-TULOKSET     |                | 06-04-2011              |                    |                  |
| Kohde: Vuosaari                        |                      |     | Rakenne: Pohjamaa J |                | kyk16                   |                    |                  |
| Laskentatiedot                         |                      |     |                     |                |                         |                    |                  |
| Rakenne                                |                      |     |                     |                |                         |                    |                  |
| Kerros                                 | E-moduuli<br>[MN/m²] |     | Paksuus<br>[cm]     | Poisson        | Isotropia<br>[iso/anis] | Sidonta<br>[0...1] |                  |
| *AB_staattine                          | 1                    | 150 | 6                   | 0,35           | iso                     | 1,00               |                  |
| *KaM_Staat.                            | 2                    | 150 | 11                  | 0,35           | iso                     | 1,00               |                  |
| *Jkv_M_Staa                            | 3                    | 117 | 30                  | 0,35           | iso                     | 1,00               |                  |
| *Mhiekkä_St                            | 4                    | 10  | 73                  | 0,35           | iso                     | 1,00               |                  |
| *Hk50_staatt.                          |                      | 10  |                     | 0,35           | iso                     |                    |                  |
| Kuormitustiedot                        |                      |     |                     |                |                         |                    |                  |
| Kuorma                                 | Paino<br>[kN]        |     | Säde<br>[cm]        | Paine<br>[kPa] | - X -<br>[cm]           | - Y -<br>[cm]      | Nopeus<br>[km/h] |
| 2 konttia                              | 1                    | 137 | 9,6                 | 4 760          | 0                       | 0                  |                  |

| <b>Laskentatulokset</b> (Vuosaari / Pohjamaa J) |                |                 |         |         |                 |         |         |                         |                  |
|---|----------------|-----------------|---------|---------|-----------------|---------|---------|-------------------------|------------------|
| <b>Sijainti 1</b>                               |                | <b>X= 0,000</b> |         |         | <b>Y= 0,000</b> |         |         |                         |                  |
| Kerros  | Syvyys<br>[cm] | Venymä [µs]     |         |         | Jännitys [kPa]  |         |         | Jännitys-<br>tila [kPa] | Siirtymä<br>[µm] |
|   |                | x               | y       | z       | x               | y       | z       |                         |                  |
| *AB_staattine                                   | 1              | 0,0             | -8558,7 | -8558,7 | -10555,3        | -4538,2 | -4538,2 | -4760,0                 |                  |
|   |                | 3,0             | -307,4  | -307,4  | -18854,0        | -2557,9 | -2557,9 | -4618,6                 | 9735,6           |
|   |                | 6,0             | 3920,3  | 3920,3  | -20866,4        | -1252,9 | -1252,9 | -4007,0                 | 10691            |
| *KaM_Staat.                                     | 2              | 6,0             | 3920,4  | 3920,4  | -20866,5        | -1252,9 | -1252,9 | -4007,0                 | 10691            |
|   |                | 11,5            | 4676,7  | 4676,7  | -15356,4        | -258,5  | -258,5  | -2484,4                 | 9675             |
|   |                | 17,0            | 4165,0  | 4165,0  | -10497,4        | 181,8   | 181,8   | -1447,3                 | 8982             |
| *Jkv_M_Staa                                     | 3              | 17,0            | 4165,0  | 4165,0  | -12193,2        | -29,6   | -29,6   | -1447,4                 | 8982             |
|   |                | 32,0            | 2113,0  | 2113,0  | -4319,1         | 173,7   | 173,7   | -383,7                  | 7886             |
|   |                | 47,0            | 3257,7  | 3257,7  | -3966,5         | 540,0   | 540,0   | -86,0                   | 7343             |
| *Mhiekka_St                                     | 4              | 47,0            | 3257,6  | 3257,6  | -8869,6         | 3,8     | 3,8     | -86,0                   | 7343             |
|   |                | 83,5            | 1390,7  | 1390,7  | -3909,8         | 0,5     | 0,5     | -38,7                   | 5235             |
|   |                | 120,0           | 853,7   | 853,7   | -2386,8         | 0,5     | 0,5     | -23,6                   | 4124             |
| *Hk50 staatt                                    | 5              | 120,0           | 853,7   | 853,7   | -2386,8         | 0,5     | 0,5     | -23,6                   | 4124             |

Liite N.4 Vuosaaren sataman vaihtoehtoinen mitoitus - APAS, 3 konttia

|                     |                      |                     |                |                         |                    |                  |
|---------------------|----------------------|---------------------|----------------|-------------------------|--------------------|------------------|
| JP-Transplan Oy     |                      | STRESS-TULOKSET     |                | 06-04-2011              |                    |                  |
| 27FE-7277-7B4E-2600 |                      |                     |                |                         |                    |                  |
| Kohde: Vuosaari     |                      | Rakenne: Pohjamaa J |                | kyk16                   |                    |                  |
| Laskentatiedot      |                      |                     |                |                         |                    |                  |
| Rakenne             |                      |                     |                |                         |                    |                  |
| Kerros              | E-moduuli<br>[MN/m²] | Paksuus<br>[cm]     | Poisson        | Isotropia<br>[iso/anis] | Sidonta<br>[0...1] |                  |
| *AB_staattine       | 1 150                | 18                  | 0,35           | iso                     | 1,00               |                  |
| *KaM_Staat.         | 2 150                | 20                  | 0,35           | iso                     | 1,00               |                  |
| *Jkv_M_Staa         | 3 117                | 35                  | 0,35           | iso                     | 1,00               |                  |
| *Mhiekka_St         | 4 10                 | 47                  | 0,35           | iso                     | 1,00               |                  |
| *Hk50_staatt.       | 10                   |                     | 0,35           | iso                     |                    |                  |
| Kuormitustiedot     |                      |                     |                |                         |                    |                  |
| Kuorma              | Paino<br>[kN]        | Säde<br>[cm]        | Paine<br>[kPa] | - X -<br>[cm]           | - Y -<br>[cm]      | Nopeus<br>[km/h] |
| 3 konttia           | 1 183                | 9,6                 | 6 340          | 0                       | 0                  |                  |

| <b>Laskentatulokset</b> (Vuosaari / Pohjamaa J) |                |                 |         |         |                 |         |         |                         |                  |
|---|----------------|-----------------|---------|---------|-----------------|---------|---------|-------------------------|------------------|
| <b>Sijainti 1</b>                               |                | <b>X= 0,000</b> |         |         | <b>Y= 0,000</b> |         |         |                         |                  |
| Kerros  | Syvyys<br>[cm] | Venymä [µs]     |         |         | Jännitys [kPa]  |         |         | Jännitys-<br>tila [kPa] | Siirtymä<br>[µm] |
|   |                | x               | y       | z       | x               | y       | z       |                         |                  |
| *AB_staattine                                   | 1              | 0,0             | -9578,0 | -9578,0 | -16020,7        | -5624,2 | -5624,2 | -6340,0                 |                  |
|   |                | 9,0             | 6986,7  | 6986,7  | -25352,2        | -698,7  | -698,7  | -4291,9                 | 5692,8           |
|   |                | 18,0            | 4158,4  | 4158,4  | -12560,0        | -88,0   | -88,0   | -1945,6                 | 8484             |
| *KaM_Staat.                                     | 2              | 18,0            | 4158,5  | 4158,5  | -12560,2        | -88,0   | -88,0   | -1945,6                 | 8484             |
|   |                | 28,0            | 2234,8  | 2234,8  | -6128,0         | 33,3    | 33,3    | -895,9                  | 7600             |
|   |                | 38,0            | 1706,3  | 1706,3  | -3734,1         | 147,9   | 147,9   | -456,6                  | 7129             |
| *Jkv_M_Staa                                     | 3              | 38,0            | 1706,3  | 1706,3  | -4269,1         | 61,3    | 61,3    | -456,6                  | 7129             |
|   |                | 55,5            | 1206,9  | 1206,9  | -2112,5         | 135,1   | 135,1   | -152,6                  | 6612             |
|   |                | 73,0            | 1814,2  | 1814,2  | -2206,1         | 301,0   | 301,0   | -47,4                   | 6267             |
| *Mhiekka_St                                     | 4              | 73,0            | 1814,2  | 1814,2  | -4906,3         | 2,4     | 2,4     | -47,4                   | 6267             |
|   |                | 96,5            | 1162,0  | 1162,0  | -3226,8         | 0,8     | 0,8     | -31,7                   | 5337             |
|   |                | 120,0           | 847,8   | 847,8   | -2378,6         | 0,4     | 0,4     | -23,5                   | 4688             |
| *Hk50 staatt                                    | 5              | 120,0           | 847,8   | 847,8   | -2378,6         | 0,4     | 0,4     | -23,5                   | 4688             |

Liite N.5 Vuosaaren sataman vaihtoehtoinen APAS-mitoitus - kantavuuslaskennat

$$E_Y = \frac{E_A}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \times \left(\frac{h}{a}\right)^2}}\right) \times \frac{E_A}{E} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \times \left(\frac{h}{a}\right)^2} \times \left(\frac{E}{E_A}\right)^{2/3}}}$$

**Konttiryhmä, 1 kontti:**

| Rakennekerros                | $E_A$<br>[MPa] | $h$<br>[m] | $E$<br>[MPa] | $E_{max}$<br>[MPa] | $E_Y$<br>[MPa] |      |
|------------------------------|----------------|------------|--------------|--------------------|----------------|------|
| Pohjamaa J                   |                |            |              |                    |                |      |
| Suodatinkerros, merihiekka   | 50             | 0,34       | 50           | 300                | 50             |      |
| Jakava kerros, kalliomurske  | 50             | 0,30       | 280          | 300                | 128            | 165* |
| Kantava kerros, kalliomurske | 128            | 0,10       | 350          | 612                | 157            | 192* |
| Päällyste, asfalttibetoni    | 157            | 0,06       | 2500         | -                  | <b>210</b>     | 250* |

\* Käytetty liitteen C.4 mukaista Vuosaaren sataman pudotustiivistysalustan kantavuutta 165 MPa kkl-luokilla 3-5 jakavan kerroksen päältä saavutettavalle kantavuudelle.

**Konttiryhmä, 2 konttia:**

| Rakennekerros                | $E_A$<br>[MPa] | $h$<br>[m] | $E$<br>[MPa] | $E_{max}$<br>[MPa] | $E_Y$<br>[MPa] |      |
|------------------------------|----------------|------------|--------------|--------------------|----------------|------|
| Pohjamaa J                   |                |            |              |                    |                |      |
| Suodatinkerros, merihiekka   | 50             | 0,73       | 50           | 300                | 50             |      |
| Jakava kerros, kalliomurske  | 50             | 0,30       | 280          | 300                | 128            | 165* |
| Kantava kerros, kalliomurske | 128            | 0,11       | 350          | 1104               | 161            | 196* |
| Päällyste, asfalttibetoni    | 161            | 0,06       | 2500         | -                  | <b>215</b>     | 255* |

\* Käytetty liitteen C.4 mukaista Vuosaaren sataman pudotustiivistysalustan kantavuutta 165 MPa kkl-luokilla 3-5 jakavan kerroksen päältä saavutettavalle kantavuudelle.

**Konttiryhmä, 3 konttia:**

| Rakennekerros                   | $E_A$<br>[MPa] | $h$<br>[m] | $E$<br>[MPa] | $E_{max}$<br>[MPa] | $E_Y$<br>[MPa] |      |
|---------------------------------|----------------|------------|--------------|--------------------|----------------|------|
| Pohjamaa J                      |                |            |              |                    |                |      |
| Suodatinkerros, merihiekka      | 50             | 0,47       | 50           | 300                | 50             |      |
| Jakava kerros, kalliomurske     | 50             | 0,35       | 280          | 300                | 143            | 180* |
| Kantava kerros, kalliomurske    | 102            | 0,20       | 350          | 1032               | 212            | 243* |
| Päällyste, asfalttibetoni / ABK | 212            | 0,18       | 2500         | -                  | <b>525</b>     | 575* |

\* Käytetty liitteen C.4 mukaista Vuosaaren sataman pudotustiivistysalustan kantavuutta 180 MPa kkl-luokilla 1-2 jakavan kerroksen päältä saavutettavalle kantavuudelle.